



Cláudia Rodrigues Mendes

Licenciada em Engenharia do Ambiente

**Métodos inovadores para a bio-secagem do CDR
produzido na linha de processo da unidade de
Tratamento Mecânico e Biológico (TMB) – Caso de
estudo na VALNOR SA**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia do Ambiente, Perfil de Engenharia Sanitária

Orientador: Artur João Lopes Cabeças, Professor Auxiliar
Convidado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da
Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Prof. Doutora Maria da Graça Madeira Martinho
Arguente: Prof. Carlos Manuel Martins
Vogal: Prof. Artur João Lopes Cabeças



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Outubro, 2014



Cláudia Rodrigues Mendes

Licenciada em Engenharia do Ambiente

**Métodos inovadores para a bio-secagem do CDR
produzido na linha de processo da unidade de
Tratamento Mecânico e Biológico (TMB) – Caso de
estudo na VALNOR SA**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia do Ambiente, Perfil de Engenharia Sanitária

Orientador: Artur João Lopes Cabeças, Professor Auxiliar
Convidado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da
Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Prof. Doutora Maria da Graça Madeira Martinho
Arguente: Prof. Carlos Manuel Martins
Vogal: Prof. Artur João Lopes Cabeças



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Outubro, 2014

Métodos inovadores para a bio-secagem do CDR produzido na linha de processo da unidade de Tratamento Mecânico e Biológico (TMB) – Caso de estudo na VALNOR SA

Copyright © Cláudia Rodrigues Mendes, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade

Nova de Lisboa

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, ao Prof. Artur Cabeças, pelo incentivo e pelas discussões que contribuíram para ultrapassar obstáculos que foram surgindo. Pela sua disponibilidade e generosidade demonstradas ao longo da elaboração da dissertação, assim como por todas as oportunidades que me proporcionou.

À VALNOR SA, em particular ao Eng. José Pinto Rodrigues, Eng. Cátia Vital e Nuno Silva, e um especial agradecimento à Dra. Cláudia Simões pelo apoio prestado.

Ao AVE - Gestão Ambiental e Valorização Energética, SA, ao Dr. Luis Realista, e em particular ao Eng. Marco Marta pela sua disponibilidade.

Aos meus Pais, pessoas que foram sempre um exemplo de coragem, amor e perseverança, por me terem transmitido valores que fizeram de mim a pessoa que sou hoje.

Ao Ricardo, pelas palavras de incentivo, por todo o apoio prestado, e por sempre ter acreditado que eu era capaz.

Resumo

A presente dissertação foca-se em métodos inovadores para a bio-secagem do Combustível Derivado de Resíduos (CDR) produzido na linha de Tratamento Mecânico de Biológico (TMB), na VALNOR SA.

O CDR representa 25 a 35% dos resíduos indiferenciados tratados numa unidade de TMB e que resulta do refugo e rejeitados retirados na linha de triagem mecânica e no processo de afinação do composto orgânico. O CDR pode ser utilizado como combustível alternativo ao combustível fóssil em centrais de co-geração e/ou cimenteiras.

No caso da indústria cimenteira, a secagem do CDR é fundamental (a humidade média é de 40 a 50% e, terá de se reduzir para 20% ou inferior) de modo a aumentar o seu Poder Calorífico Inferior (PCI), para maior eficiência energética no processo produtivo nos fornos do clínquer e dar cumprimento à redução de utilização dos combustíveis fósseis que a União Europeia pretende.

Com este trabalho, contribuiu-se com mais um passo no sentido de se viabilizarem as melhores opções técnico-ambientais e económicas para se cumprirem os objetivos prioritários no domínio da valorização dos resíduos passando a ser um recurso ou produto.

Com efeito a substituição do combustível fóssil por um combustível alternativo do tipo do CDR não só se traduz em benefícios ambientais, nomeadamente a redução de deposição em aterro, a redução das emissões de Gases com Efeito de Estufa (GEE) e o cumprimento dos objetivos e metas do Plano Estratégico para os Resíduos Sólidos Urbanos (PERSU) 2020, como também enquadra evidentes vantagens económicas enquanto recurso alternativo e minimiza o valor do instrumento financeiro da Taxa de Gestão de Resíduos (TGR) que se prevê aumentar significativamente até 2020 no que respeita à deposição de resíduos/refugos/rejeitados em aterro.

Palavras-chave: CDR, TMB, Refugo, Rejeitados, Bio-secagem, Teor de humidade

Abstract

This thesis focuses on innovative methods to bio-drying Refuse Derived Fuel (RDF) produced in the Mechanical and Biological Treatment (MBT) line, in VALNOR SA.

RDF represents 25 to 35% of mixed waste treated in MBT unit and results of scrap and rejected removed in the mechanical sorting line and the adjustment of the organic compost process. The RDF can be used as an alternative fuel to fossil fuel in co-generation plants and/or cement plants.

In the case of the cement industry, RDF drying is essential (the average humidity is 40 to 50%, and must be reduced to 20% or lower) in order to increase its Net Calorific Value (NCV) for energy efficiency in the production process kilns and clinker comply with reduced use of fossil fuels that the European Union wants.

This work, contributed with a further step in order to enable the best technical- environmental and economic options to meet the priority goals in the field of waste recovery becoming a resource or product.

Indeed the replacement of fossil fuel with alternative fuel type such as RDF not only translates into environmental benefits, including reducing landfilling, reducing emissions of Greenhouse Gases (GHG) and the enforcement of the objectives and goals of the Strategic Plan for the Municipal Solid Waste (PERSU) 2020, but also fits obvious economic advantages as an alternative resource and minimizes the value of the financial instrument of Waste Management Rate (TGR) is expected to increase significantly by 2020 with respect to the deposition of waste/scrap/rejected in landfill.

Keywords: RDF, MBT, Scrap, Rejected, Bio-Dry, Humidity content

Índice

1 Introdução.....	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivos	3
1.3 Estrutura da dissertação	4
2 Enquadramento Geral	5
2.1 Enquadramento legislativo	5
2.2 Enquadramento da gestão de resíduos em Portugal	7
2.2.1 Caracterização da situação atual.....	7
2.2.2 Produção de RU.....	7
2.2.3 Gestão de RU.....	8
2.3 Estratégia para os CDR	10
2.4 Norma Portuguesa 4486.....	11
2.4.1 Classificação	12
2.4.2 Metodologia e apresentação do código de classe	12
2.5 Fim do estatuto de resíduo	13
2.6 Taxa de Gestão de Resíduos	13
3 Estado da Arte.....	17
3.1 Economia circular	17
3.2 Desafios na União Europeia: <i>waste-to-energy</i>	18
3.3 Objetivos do PERSU 2020	19
3.4 Problemática dos combustíveis fósseis.....	20
3.5 Soluções de valorização e destino final de RU	22
3.5.1 Valorização multimaterial	22
3.5.2 Valorização orgânica.....	22
3.5.3 Valorização energética.....	26
3.5.4 Confinamento técnico de RU – Aterro sanitário.....	30
3.6 Combustível Derivado de Resíduos	31
3.7 SECIL.....	32
3.7.1 Processo produtivo de cimento.....	32
3.7.2 Combustíveis alternativos aos combustíveis fósseis.....	34
3.7.3 Limitações na utilização do CDR	35
3.8 Métodos para a redução da humidade	36
3.8.1 Bio-secagem	36
3.8.2 Outros métodos de secagem	39
4 Caso de Estudo	43
4.1 VALNOR SA	43
4.1.1 Dados de produção da VALNOR	44
4.1.2 Descrição da Central de Valorização Orgânica	48
4.1.3 Descrição técnica da unidade de preparação de CDR.....	57
4.1.4 Protocolo com a SECIL.....	65
5 Metodologia	67

5.1 Metodologia de análise às amostras	67
5.1.1 Ensaios de bio-secagem na VALNOR	67
5.1.2 Ensaios de bio-secagem com telas	70
5.2 Planeamento dos trabalhos	70
6 Análise e Discussão de Resultados	73
6.1 Ensaios de bio-secagem realizado na VALNOR	73
6.1.1 Bio-secagem em túneis	73
6.1.2 Bio-secagem em baia	81
6.2 Ensaio de bio-secagem com telas	91
6.3 Emissões	100
6.4 Discussão de Resultados	101
6.4.1 Resultados dos ensaios de bio-secagem	101
6.4.2 PCI do ensaio de bio-secagem com telas	101
7 Conclusão	105
Bibliografia	112

Índice de Figuras

Figura 1.1: Hierarquia de gestão de resíduos	1
Figura 2.1: Produção e captação de RU em Portugal continental	8
Figura 2.2: Destino dos RU produzidos em Portugal continental em 2012	9
Figura 2.3: Caracterização física dos RU produzidos em Portugal continental (média), no ano 2012	9
Figura 3.1: Diagrama de blocos do TMB convencional	24
Figura 3.2: Diagrama de blocos do TMB alimentado por resíduos da recolha indiferenciada	25
Figura 3.3: Diagrama do fabrico de cimento da SECIL	32
Figura 3.4: Introdução do CDR como combustível alternativo	35
Figura 3.5: Equipamento de secagem térmica da STELA	41
Figura 3.6: Equipamento de secagem térmica da ANDRITZ - Sistema tubo cilíndrico “tipo trommel”. 41	
Figura 4.1: Mapa dos sistemas de gestão de RU em Portugal continental, onde se inclui a VALNOR 43	
Figura 4.2: Mapa de abrangência da VALNOR	44
Figura 4.3: Destinos diretos dos RU, em percentagem	44
Figura 4.4: Destinos diretos dos RU, por sistema	45
Figura 4.5: Caracterização física dos RU recolhidos indiferenciadamente na VALNOR, 2013	46
Figura 4.6: Linha de funcionamento da CVO	49
Figura 4.7: Garra que apanha os RU	50
Figura 4.8: <i>Trommel</i> 300 mm	51
Figura 4.9: Abre-sacos	51
Figura 4.10: Triagem B	52
Figura 4.11: Rejeitados depositados em dois contentores distintos	53
Figura 4.12: Triagem A	53
Figura 4.13: Pós-compostagem, maturação	55
Figura 4.14: Revolteadora	55
Figura 4.15: Diagrama de processo da CVO	56
Figura 4.16: Composição física do refugo da CVO, 2013	57
Figura 4.17: Equipamento móvel da unidade de preparação de CDR	58
Figura 4.18: Triturador primário	58
Figura 4.19: Transportador	59
Figura 4.20: Pormenor do transportador visto em corte	59
Figura 4.21: Separador magnético	60
Figura 4.22: Separador de impróprios pesados <i>windhopper</i>	60
Figura 4.23: Transportador	61
Figura 4.24: Pormenor do transportador visto em corte	61
Figura 4.25: Transportador reversível giratório (tipo "borboleta")	62
Figura 4.26: Triturador secundário	63
Figura 4.27: Zona de armazenamento de CDR	63
Figura 4.28: CDR – produto final	64
Figura 4.29: Bocas de aspiração e captação de poeiras	64

Figura 4.30: Diagrama linear do processo de produção do CDR	65
Figura 5.1: Estufa utilizada na análise do teor de humidade, localizada nos laboratórios VALNOR ...	69
Figura 5.2: Pesagem amostras antes e após secagem estufa realizada nos laboratórios VALNOR ..	69
Figura 5.3: Equação utilizada no cálculo da humidade.....	70
Figura 6.1: Túneis utilizados para a secagem biológica do CDR, localizados na VALNOR	74
Figura 6.2: Túnel de secagem biológica de CDR, localizado na VALNOR	74
Figura 6.3: Túnel preparado para a secagem biológica do CDR, localizado na VALNOR.....	75
Figura 6.4: Computador que regista evolução do ensaio de secagem biológica em túnel	75
Figura 6.5: Teor de humidade no 1.º ensaio de bio-secagem em túnel	76
Figura 6.6: Teor de humidade no 2.º ensaio de bio-secagem em túnel	76
Figura 6.7: Teor de humidade no 3.º ensaio de bio-secagem em túnel	77
Figura 6.8: Teor de humidade no 4.º ensaio de bio-secagem em túnel	77
Figura 6.9: Teor de humidade no 5.º ensaio de bio-secagem em túnel	78
Figura 6.10: Teor de humidade no 6.º ensaio de bio-secagem em túnel	78
Figura 6.11: Teor de humidade no 7.º ensaio de bio-secagem em túnel	79
Figura 6.12: Teor de humidade no 8.º ensaio de bio-secagem em túnel	79
Figura 6.13: Teor de humidade no 9.º ensaio de bio-secagem em túnel	80
Figura 6.14: Teor de humidade no 10.º ensaio de bio-secagem em túnel	80
Figura 6.15: Teor de humidade no 11.º ensaio de bio-secagem em túnel	81
Figura 6.16: Baia onde se realizaram os ensaios de bio-secagem de CDR	82
Figura 6.17: Baia contendo a amostra de CDR para o ensaio de bio-secagem de CDR.....	82
Figura 6.18: Colocação da tela sobre a amostra de CDR	83
Figura 6.19: Manta com a qual se cobre a pilha de CDR no decorrer do ensaio	83
Figura 6.20: Ventilador	84
Figura 6.21: Canais do O ₂ da pilha	84
Figura 6.22: Sondas de medição de O ₂ e de temperatura da pilha	85
Figura 6.23: Sondas de medição de O ₂ e temperatura já colocadas na tela, em contacto com pilha	85
Figura 6.24: Equipamento de controlo da pilha de CDR.....	85
Figura 6.25: Fluxograma do processo existente na preparação de CDR para o ensaio de bio-secagem em baia	86
Figura 6.26: Teor de humidade no 1.º ensaio de bio-secagem em baia	86
Figura 6.27: Teor de humidade no 2.º ensaio de bio-secagem em baia	87
Figura 6.28: Teor de humidade no 3.º ensaio de bio-secagem em baia	87
Figura 6.29: Teor de humidade no 4.º ensaio de bio-secagem em baia	88
Figura 6.30: Teor de humidade no 5.º ensaio de bio-secagem em baia	88
Figura 6.31: Teor de humidade no 6.º ensaio de bio-secagem em baia	89
Figura 6.32: Teor de humidade no 7.º ensaio de bio-secagem em baia	89
Figura 6.33: Teor de humidade no 8.º ensaio de bio-secagem em baia	90
Figura 6.34: Teor de humidade no 9.º ensaio de bio-secagem em baia	90
Figura 6.35: Teor de humidade no 10.º ensaio de bio-secagem em baia	91

Figura 6.36: Pilha de CDR preparado para receber a cobertura com tela, elaborado pela CONVAERO, nas instalações da VALNOR	92
Figura 6.37: Pilha de CDR semi coberta com a tela	92
Figura 6.38: Pilha de CDR totalmente coberta com tela	93
Figura 6.39: Pormenor do ventilador utilizado na secagem biológica do CDR.....	93
Figura 6.40: Cabine onde se encontra o computador que regista os dados, junto à pilha de CDR localizada na VALNOR	94
Figura 6.41: Teor de humidade no 1.º ensaio de bio-secagem com tela.....	94
Figura 6.42: Teor de humidade no 2.º ensaio de bio-secagem com tela.....	95
Figura 6.43: Teor de humidade no 3.º ensaio de bio-secagem com tela.....	95
Figura 6.44: Teor de humidade no 4.º ensaio de bio-secagem com tela.....	96
Figura 6.45: Teor de humidade no 5.º ensaio de bio-secagem com tela.....	96
Figura 6.46: Teor de humidade no 6.º ensaio de bio-secagem com tela.....	97
Figura 6.47: Teor de humidade no 7.º ensaio de bio-secagem com tela.....	97
Figura 6.48: Teor de humidade no 8.º ensaio de bio-secagem com tela.....	98
Figura 6.49: Teor de humidade no 9.º ensaio de bio-secagem com tela.....	98
Figura 6.50: Teor de humidade no 10.º ensaio de bio-secagem com tela	99
Figura 6.51: Teor de humidade no 11.º ensaio de bio-secagem com tela	99
Figura 6.52: Teor de humidade no 12.º ensaio de bio-secagem com tela	100
Figura 6.53: Perdas de humidade em cada um dos ensaios de bio-secagem	101
Figura 6.54: PCI do ensaio de bio-secagem com telas	102

Índice de Tabelas

Tabela 2.1: Sistema de classificação para o CDR	12
Tabela 2.2: Taxa de gestão de resíduos para o ano 2013	14
Tabela 2.3: Valores para TGR 2020	14
Tabela 2.4: Valores para TGR 2020	15
Tabela 3.1: Processos térmicos para a recuperação de energia.....	27
Tabela 4.1: Dados de produção	45
Tabela 4.2: Objetivos de qualidade do CDR produzido na VALNOR	48
Tabela 4.3: Parâmetros médios de qualidade do CDR encaminhado para a SECIL	65
Tabela 6.1: Síntese das vantagens e desvantagens de cada um dos ensaios de bio-secagem	103

Lista de abreviaturas, siglas e símbolos

APA – Agência Portuguesa do Ambiente

b.s. – Base seca

C – Carbono

Cl – Cloro

CDR – Combustível Derivado de Resíduos

CE – Comissão Europeia

CEN – Comité Europeu de Normalização

CH₄ – Metano

cm – Centímetro

CO – Monóxido de carbono

CO₂ – Dióxido de carbono

CO₂ eq. – Dióxido de carbono equivalente

CSR – Combustível Sólido Recuperado

CVO – Central de Valorização Orgânica

DA – Digestão Anaeróbia

DL – Decreto-Lei

DQR – Diretiva Quadro de Resíduos

EGF – Empresa Geral do Fomento

GEE – Gases com Efeito de Estufa

H₂O – Água

Hg – Mercúrio

kg – Quilograma

L – Litro

LER – Lista Europeia de Resíduos

m – Metro

m² – Metro quadrado

m³ – Metro cúbico

MW – MegaWatt

mm – Milímetro

NP – Norma Portuguesa

NO – Monóxido de azoto

NO₂ – Dióxido de azoto

O₂ – Oxigénio

PCI – Poder Calorífico Inferior

PERSU – Plano Estratégico para os Resíduos Sólidos Urbanos

PPRU – Programa de Prevenção de Resíduos Urbanos

RGGR – Regime Geral da Gestão de Resíduos

RIP – Resíduos Industriais Perigosos

RINP – Resíduos Industriais Não Perigosos

RU – Resíduos Urbanos

RUB – Resíduos Urbanos Biodegradáveis

SO₂ – Dióxido de enxofre

t – Toneladas

t.q. – Tal Qual

TB – Tratamento Biológico

TGR – Taxa de Gestão de Resíduos

TM – Tratamento Mecânico

TMB – Tratamento Mecânico e Biológico

UE – União Europeia

1 Introdução

1.1 Enquadramento

A crescente produção de resíduos faz com que exista uma preocupação cada vez maior em conceber um destino adequado, ou seja, com que este recurso seja devidamente valorizado, de modo a reduzir a pressão sobre o ambiente.

Apesar dos diversos esforços no sentido de Portugal atingir um crescimento sustentável e eficiente na utilização de recursos, ainda não foi conseguida a dissociação do crescimento económico dos impactes ambientais relacionados com a produção de resíduos (APA, 2013b).

O Decreto-Lei (DL) n.º 73/2011, de 17 de Junho, define resíduos como sendo "quaisquer substâncias ou objetos de que o detentor se desfaz ou tem a intenção ou a obrigação de se desfazer" (MAOT, 2011).

Os resíduos não devem ser considerados um problema, devem sim, ser encarados como uma oportunidade.

Nesse sentido, a hierarquia de gestão de resíduos, representada na Figura 1.1, deverá ser aplicada enquanto princípio geral da legislação e da política de prevenção e gestão de resíduos.



Figura 1.1: Hierarquia de gestão de resíduos (Ferrão e Pinheiro, 2011)

Em Portugal, até ao final do século passado, a maioria dos resíduos urbanos (RU) produzidos, eram despejados em lixeiras (Carvalho e Marques, 2014).

Até 1993, a situação global do setor dos resíduos em Portugal era inaceitável e apresentava dificuldades em responder aos novos desafios impostas pela União Europeia (UE) (ERSAR, 2013).

Em 1995, existiam, em Portugal continental, aproximadamente 300 lixeiras a céu aberto, fumegantes, nauseabundas e repelentes (Cabeças, 2013).

O setor de gestão de RU tem revelado nas últimas duas décadas uma evolução assinalável em Portugal, comprovada pelo facto de em 1994 apenas 46% dos RU terem um destino final adequado, e de este indicador ter passado a 100% a partir de 2002 (Piedade e Aguiar, 2010).

Em 1997, o Plano Estratégico para os Resíduos Sólidos Urbanos (PERSU), definia sistemas para a gestão integrada de RU, respeitando o princípio da hierarquia dos resíduos, e apresentava como principais objetivos, para o território continental (APA, 2014a):

- A erradicação de lixeiras;
- A criação de sistemas multimunicipais e intermunicipais de gestão de RU;
- A construção de infraestruturas adequadas para a recolha e tratamento de RU, tais como, ecocentros e estações de triagem e unidades de valorização orgânica;
- A criação de sistemas de recolha seletiva e reciclagem multimaterial, com recurso a ecopontos.

Em 2007 foi aprovado, através da Portaria n.º 187/2007, de 12 de Fevereiro, o Plano Estratégico para os Resíduos Sólidos Urbanos (PERSU II) para o período de 2007 a 2016 (MAOTDR, 2007). O PERSU II dava continuidade à política integrada de gestão de resíduos, de modo a dar cumprimento à legislação nacional e direito comunitário, cumprindo os requisitos de desvio de resíduos urbanos biodegradáveis (RUB) de aterro e de reciclagem e valorização de resíduos de embalagens, sendo estes, os principais objetivos do PERSU II (APA, 2014a).

O PERSU II refletiu uma grande preocupação na maximização do valor dos subprodutos das unidades de Tratamento Mecânico e Biológico (TMB): composto, materiais recicláveis e fração Combustível Derivada dos Resíduos (CDR) (MAOTDR, 2007).

O Despacho n.º 21295/2009, de 22 de Setembro, aprova a Estratégia para os CDR, e define os CDR como sendo os "combustíveis preparados a partir de resíduos não perigosos, cuja utilização visa a recuperação de energia em unidades de incineração ou de co-incineração reguladas pela legislação ambiental" (MAOTDREI, 2009).

A Estratégia para os CDR surgiu na sequência, e em complemento do PERSU II, enquadrando-se como um importante contributo para a gestão sustentada de resíduos e recursos, designadamente, através da diversificação das fontes de energia e do aproveitamento dos recursos endógenos (MAOTE, 2014a).

O PERSU II veio impulsionar o encaminhamento do CDR, a título de combustível alternativo, assim como a construção de unidades de preparação de CDR (MAOTDR, 2007).

Atualmente existem 23 sistemas de gestão de RU cobrindo a totalidade do território continental, sendo 11 multimunicipais. Cada um destes sistemas possui infraestruturas que asseguram um destino final adequado para os RU produzidos na área respetiva (EGF, 2014).

A Portaria n.º 187-A/2014, de 17 de Setembro, revoga a Portaria n.º 187/2007, de 12 de Fevereiro, e aprova o PERSU 2020, para Portugal continental, onde uma das motivações para a realização do PERSU 2020, é a necessidade de garantir o valor económico dos subprodutos e rejeitados das instalações de tratamento de RU, nomeadamente do composto e do CDR (MAOTE, 2014a).

A revisão do PERSU promoveu uma análise do desempenho dos 23 sistemas de gestão de RU do continente, nos seguintes aspetos (MAOTE, 2014a):

- Eficácia dos processos de recolha seletiva tendo em conta a densidade populacional e a capitação total de RU;
- Eficiência dos principais processos tecnológicos que integram a cadeia de valor do processamento de resíduos, nomeadamente, separação de materiais na triagem e no tratamento mecânico;
- Efetiva implementação de infraestruturas de tratamento de RU.

As principais medidas consubstanciam princípios de eficiência e de valorização dos resíduos como recursos, na medida em que, otimizando o nível de investimento:

- Privilegiam a atuação a montante da cadeia de valor;
- Promovem a eliminação progressiva da deposição direta em aterro;
- Apoiam o aumento da eficiência dos sistemas e das infraestruturas de gestão de RU;
- Aumentam o rigor, a responsabilização e a qualidade no serviço à população.

1.2 Objetivos

O principal objetivo da presente dissertação é a avaliação de diferentes métodos inovadores para a bio-secagem do CDR proveniente de TMB.

O CDR representa uma fração importante (25 a 35%) dos resíduos indiferenciados tratados numa unidade de TMB e que resulta do refugo e rejeitados retirados na linha de triagem mecânica e no processo de afinação do composto orgânico. Este material pode ser utilizado como combustível alternativo ao combustível fóssil em centrais de co-geração e/ou cimenteiras, desde que satisfaça um conjunto de requisitos e especificações técnicas exigidas em cada processo de combustão.

No caso da indústria cimenteira, a secagem deste material é fundamental (a humidade média é de 40 a 50% e, tem de se reduzir para 20% ou inferior) de modo a aumentar o seu Poder Calorífico Inferior (PCI), para maior eficiência energética nos fornos do clínquer.

Sendo a pré-secagem com recurso a energia térmica um processo oneroso que inviabiliza economicamente a utilização do CDR como combustível alternativo, na VALNOR encontra-se em desenvolvimento um estudo inovador relativo à tentativa de encontrar um processo de secagem através de duas alternativas por bio-secagem, sendo elas:

- Insuflação de ar nas pilhas formadas com CDR cobertas com uma tela (esta tela ou manta, trata-se de um geocompósito especial que permite a saída de ar, mas retém a entrada de ar do exterior);
- Substituição da massa de resíduos em regra colocada nos túneis de compostagem, por CDR.

Pretende-se que através do aumento da temperatura associada à degradação da matéria orgânica residual (fermentação) ainda existente no refugo/rejeitados (com e/ou sem trituração prévia) se possa promover a bio-secagem do CDR para a diminuição pretendida da humidade e incremento do seu PCI.

1.3 Estrutura da dissertação

Com o foco na concretização dos objetivos, a presente dissertação encontra-se organizada em duas partes distintas. Na primeira parte, aborda-se o enquadramento geral e estado da arte, e uma segunda parte com incidência no estudo efetuado no "caso de estudo" desenvolvido na VALNOR.

A primeira parte engloba o Capítulo 1, Capítulo 2 e Capítulo 3, com as seguintes temáticas:

- Capítulo 1 – Introdução, que engloba o enquadramento, objetivos e estrutura da dissertação;
- Capítulo 2 – Enquadramento geral, onde se aborda o enquadramento legislativo e caracterização da situação atual;
- Capítulo 3 – Estado da arte, com principal destaque na revisão bibliográfica e científica.

Na segunda parte desenvolvem-se os cinco capítulos, referentes ao caso de estudo da VALNOR:

- Capítulo 4 – Descrição pormenorizada das instalações técnicas e operacionais da VALNOR;
- Capítulo 5 – Metodologia adotada aplicada ao caso de estudo;
- Capítulo 6 – Análise e discussão de resultados obtidos;
- Capítulo 7 – Conclusão e considerações finais.

2 Enquadramento Geral

2.1 Enquadramento legislativo

A Diretiva Quadro de Resíduos (DQR) (Diretiva 2008/98/CE, de 19 de Novembro), transposta pelo DL n.º 73/2011, de 17 de Junho, que altera e republica o DL n.º 178/2006, de 5 de Setembro (MAOT, 2011) (MAOTDR, 2006), "define conceitos-chave, como os de resíduo, valorização e eliminação, e estabelece os requisitos essenciais para a gestão de resíduos". Define igualmente princípios fundamentais, como a obrigação de tratamento dos resíduos de uma forma que não tenha impactos negativos no ambiente e na saúde humana, a hierarquia dos resíduos e, de acordo com o princípio do poluidor-pagador (PECUE, 2008).

A DQR clarifica ainda conceitos associados à hierarquia de gestão de resíduos e à sua aplicação e dá relevo à prevenção, preparação para reutilização e à reciclagem (MAOTE, 2014a).

O Regime Geral da Gestão de Resíduos (RGGR), definido pelo DL n.º 178/2006, de 5 de Setembro, alterado e republicado pelo DL n.º 73/2011, de 17 de Junho, tem como principais determinações (MAOTE, 2014a):

- Reforço da prevenção da produção de resíduos;
- Fomento à reutilização e reciclagem de resíduos;
- Estímulo ao aproveitamento de resíduos específicos com elevado potencial de valorização;
- Estabelecimento de conceitos-chave como as definições de resíduo, prevenção, reutilização, preparação para a reutilização, tratamento e reciclagem, e a distinção entre os conceitos de valorização e eliminação de resíduos;
- Aprovação de programas de prevenção;
- Estabelecimento de metas de preparação para reutilização e reciclagem a cumprir até 2020;
- Incentivo à reciclagem que permita o cumprimento destas metas, e de preservação dos recursos naturais;
- Definição de requisitos para que substâncias ou objetos resultantes de um processo produtivo possam ser considerados subprodutos e não resíduos;
- Critérios para que determinados resíduos deixem de ter o estatuto de resíduo;
- Introdução do mecanismo da responsabilidade alargada do produtor, tendo em conta o ciclo de vida dos produtos e materiais e não apenas a fase de fim de vida, com as inerentes vantagens do ponto de vista da utilização eficiente dos recursos e do impacto ambiental;
- Sujeição das operações de gestão de resíduos a um procedimento administrativo célere de controlo prévio, que se conclui com a emissão de uma licença, e procedimentos administrativos que assegurem uma efetiva monitorização da atividade desenvolvida após esse licenciamento;
- Introdução de mecanismos de adaptação das licenças às inovações tecnológicas que constantemente surgem neste setor e de resposta a efeitos negativos para o ambiente, que

não tenham sido previstos na fase de licenciamento, introduzindo-se, igualmente, procedimentos que visam acompanhar as vicissitudes da atividade de gestão de resíduos, como sejam as da transmissão, alteração e renovação das licenças.

Em 1997, o PERSU, definia sistemas para a gestão integrada de RU, respeitando o princípio da hierarquia dos resíduos (APA, 2014a).

Em 2007 foi aprovado, através da Portaria n.º 187/2007, de 12 de Fevereiro, o PERSU II para o período de 2007 a 2016 (MAOTDR, 2007), tendo sido revogada pela Portaria n.º 187-A/2014 de 17 de Setembro (MAOTE, 2014b). O PERSU II dava continuidade à política integrada de gestão de resíduos, de modo a dar cumprimento à legislação nacional e direito comunitário, cumprindo os requisitos de desvio de RUB de aterro e de reciclagem e valorização de resíduos de embalagens (APA, 2014a).

A legislação europeia apresenta ainda outros instrumentos normativos importantes de carácter transversal, nomeadamente a Lista Europeia de Resíduos (LER), transposta pela Portaria n.º 209/2004, de 3 de Março, e o Regulamento relativo ao Movimento Transfronteiriço de Resíduos (MTR), transposto pelo DL n.º 45/2008, de 11 de Março (CCE, 2000) (MEADRPSCOTA, 2004) (PECUE, 2006) (MAOTDR, 2008).

No âmbito da gestão de RU e no que concerne às operações de gestão de resíduos, a Diretiva Aterros, transposta pelo DL n.º 183/2009, de 10 de Agosto, centra-se nas condições técnicas e de operação dos aterros e estabelece metas para a redução da colocação de resíduos biodegradáveis nestas infraestruturas (CUE, 1999) (MAOTDR, 2009). A Diretiva de Prevenção e Controlo Integrados de Poluição (PCIP), relativa às emissões industriais, transposta pelo DL n.º 127/2013, de 30 de Agosto, integra as condições técnicas e de operação aplicável à incineração e co-incineração de resíduos (PECUE, 2010) (MAMAOT, 2013).

O Despacho n.º 3227/2010, de 22 de Fevereiro, estabelecia o Programa de Prevenção de Resíduos Urbanos (PPRU), cujo objetivo era "propor medidas, mecanismos, metas e ações para a operacionalização e monitorização da prevenção de RU produzidos em Portugal" (MAOT, 2010), tendo sido revogado pela Portaria n.º 187-A/2014 de 17 de Setembro (MAOTE, 2014b).

Nas últimas duas décadas registaram-se significativas evoluções no setor dos RU em Portugal, e tornou-se fundamental a revisão do PERSU II com vista ao cumprimento das metas e estratégia comunitária para a prevenção, reciclagem, valorização dos resíduos como recurso e, em sequência, uma crescente minimização da deposição em aterro.

A Portaria n.º 187-A/2014, de 17 de Setembro, aprova o PERSU 2020, para Portugal continental (MAOTE, 2014a).

2.2 Enquadramento da gestão de resíduos em Portugal

O DL n.º 73/2011, de 17 de Junho, altera o RGGR (DL n.º 178/2006, de 5 de Setembro), e é aplicável às operações de gestão de resíduos destinadas a prevenir ou reduzir a produção de resíduos, o seu carácter nocivo e os impactes adversos decorrentes da sua produção e gestão, bem como a diminuição dos impactes associados à utilização dos recursos (MAOT, 2011).

O DL n.º 73/2011, de 17 de Junho, define a gestão de resíduos como sendo "a recolha, o transporte, a valorização e a eliminação de resíduos, incluindo a supervisão destas operações e a manutenção dos locais de eliminação no pós-encerramento" (MAOT, 2011).

O RGGR define RU como "o resíduo proveniente de habitações bem como outro resíduo que, pela sua natureza ou composição, seja semelhante ao resíduo proveniente de habitações" (MAOTDR, 2006).

Assim, são considerados RU os resíduos produzidos (APA, 2014b):

- Pelos agregados familiares (resíduos domésticos);
- Por pequenos produtores de resíduos semelhantes (produção diária inferior a 1.100 L);
- Por grandes produtores de resíduos semelhantes (produção diária igual ou superior a 1.100 L).

Assim, apenas existe diferenciação no que diz respeito à responsabilidade de gestão, cabendo a mesma aos municípios no caso de produção diária inferior a 1.100 L e aos respetivos produtores nos restantes casos.

2.2.1 Caraterização da situação atual

Ainda não foi possível dissociar o crescimento económico dos impactes ambientais relacionados com a produção de resíduos, apesar de todos os esforços realizados por Portugal (APA, 2013b).

Uma gestão adequada de resíduos permitirá prevenir ou reduzir a produção dos mesmos, o seu carácter nocivo e os impactes adversos decorrentes da sua produção e gestão, bem como a diminuição dos impactes associados à utilização dos recursos, de forma a melhorar a eficiência da sua utilização e a proteção do ambiente e da saúde humana (APA, 2013b).

2.2.2 Produção de RU

A produção total de RU em Portugal continental foi, no ano 2012, de aproximadamente 4,528 milhões de toneladas, o que corresponde a uma capitação anual de 454 kg/hab.ano, ou seja, uma produção diária de RU de 1,24 kg por habitante. Estes valores representam uma diminuição de cerca de 7,4%, em milhões de toneladas, e 6,8%, em capitação, em relação ao ano anterior, verificando-se assim uma inversão da tendência de crescimento da produção de RU em Portugal continental, que se verificou até 2010 (APA, 2013b).

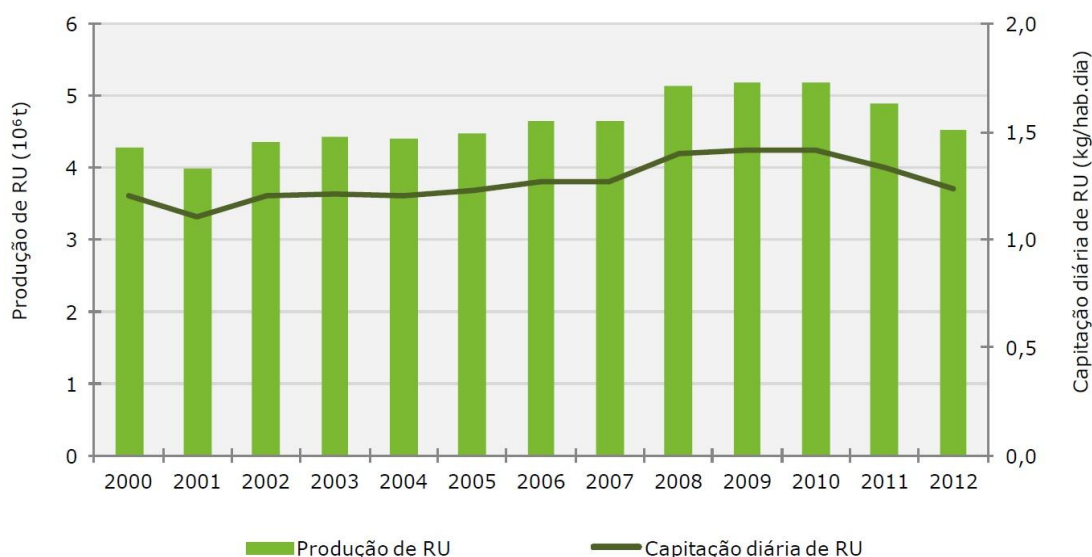


Figura 2.1: Produção e capacitação de RU em Portugal continental (APA, 2013b)

Em 2012, em Portugal continental, do total de RU recolhidos, 85,9% são provenientes de recolha indiferenciada e 14,1% de recolha seletiva, o que significa que a recolha seletiva diminuiu ligeiramente em relação ao ano anterior cujo valor atingiu os 14,8% (APA, 2013b).

2.2.3 Gestão de RU

A gestão de um sistema integrado de RU tem como objetivos gerais (Cabeças, 2013):

- A adequada recolha, transporte, tratamento e valorização, destino final dos RU produzidos, de modo a garantir a qualidade ambiental e de vida das populações;
- As condições que permitam ao sistema de RU acompanhar e responder ao desenvolvimento económico e social da região;
- A valorização de recursos associada aos RU;
- Desenvolver um quadro da maior e melhor eficiência do serviço prestado;
- A integração das soluções num quadro integrado de ações que permita a concretização das prioridades estabelecidas.

Em 2012, os RU produzidos em Portugal continental (4,528 milhões de toneladas) foram sujeitos às seguintes operações de gestão: 53,6% de deposição em aterro, 18,2% de valorização energética, 15,7% de valorização orgânica e a restante fração de 12,4% de valorização multimaterial (APA, 2013b).

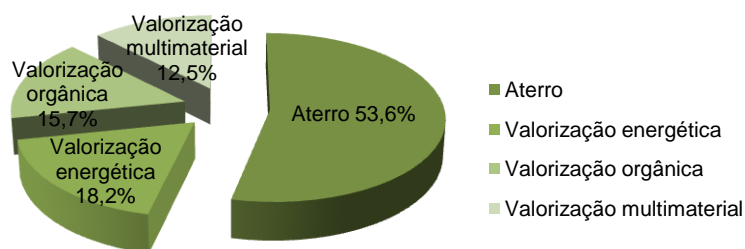


Figura 2.2: Destino dos RU produzidos em Portugal continental em 2012 (APA, 2013b)

Importa, no entanto, salientar que se acentuou a tendência de redução da fração depositada diretamente em aterro, resultado da entrada em pleno funcionamento das unidades de TMB previstas.

Na Figura 2.3 são apresentados os resultados da caracterização física dos RU produzidos em Portugal continental (média), realizados com base nas especificações técnicas da Portaria n.º 851/2009, de 7 de Agosto (MAOTDR, 2009b).

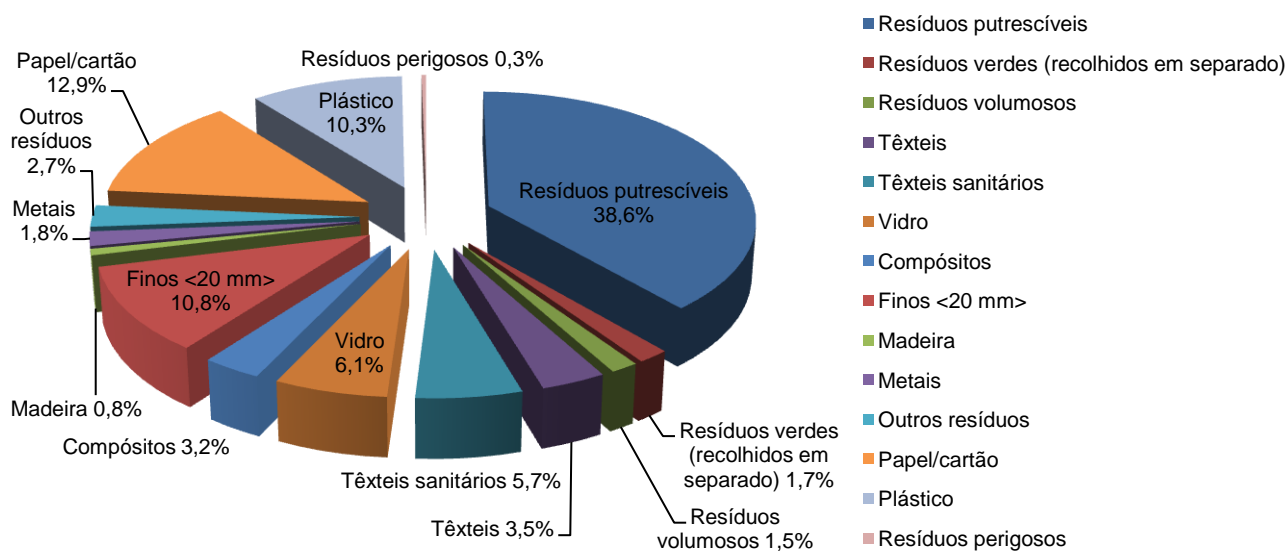


Figura 2.3: Caracterização física dos RU produzidos em Portugal continental (média), no ano 2012 (APA, 2013a)

Verifica-se que o teor em RUB é da ordem de 55%. Considera-se que a fração alvo para reutilização e recuperação material é constituída por putrescíveis, verdes, vidro, compósitos, madeira, metais, papel e cartão e plástico.

2.3 Estratégia para os CDR

Historicamente, o CDR remonta à crise do petróleo, em 1973, onde o CDR foi promovido a um combustível substituto *low cost*. Os produtores de combustíveis sólidos recuperados, deram início à implementação de um sistema de qualidade de modo a garantir a classificação do combustível e os parâmetros de especificação (ECS, 2008).

O Despacho n.º 21295/2009, de 22 de Setembro, aprova a Estratégia para os CDR, e define os CDR como sendo os "combustíveis preparados a partir de resíduos não perigosos, cuja utilização visa a recuperação de energia em unidades de incineração ou de co-incineração reguladas pela legislação ambiental" (MAOTDREI, 2009).

De modo a promover a aceitação do CDR no mercado europeu, foram elaboradas um conjunto de normas europeias para o Combustível Sólido Recuperado (CSR), elaboradas pelo comité técnico, CEN/TC 343 (Martinho e Silveira, 2008). Tratando-se o CDR de um CSR, obedece à especificação CEN/TS 15357:2006, sendo o CSR um combustível sólido preparado a partir de resíduos não perigosos, a ser utilizado para recuperação de energia em instalações de incineração ou co-incineração, e que cumpra os requisitos de classificação e especificações preconizados na especificação técnica CEN/TS 15359:2006 (ECS, 2006a).

A Estratégia para os CDR delineou quatro eixos de intervenção (linhas estratégicas, enquadradas nas políticas de gestão de resíduos e energética e num quadro de proteção da saúde pública e do ambiente), sendo eles (MAOTDREI, 2009):

- Eixo I - Potenciar a valorização dos resíduos e utilização de recursos energéticos endógenos de modo a minimizar a quantidade de resíduos a depositar em aterro;
- Eixo II - Assegurar a harmonização na oferta e procura de CDR;
- Eixo III - Concretizar os princípios da auto-suficiência e da proximidade;
- Eixo IV - Desenvolver o conhecimento e a inovação tecnológica promovendo a competitividades e a qualificação dos intervenientes.

No âmbito da política comunitária para a energia, a UE estabeleceu o objetivo comum de, até 2020, aumentar para 20% o peso das energias provenientes de fontes renováveis no consumo final bruto da Comunidade, de reduzir em 20% as emissões de CO₂ e de melhorar a eficiência energética em 20%. Como objetivo específico para Portugal, foi fixado, na Diretiva Renováveis (Diretiva 2009/28/CE), para 2020, a quota de 31% de energia de fontes renováveis no consumo bruto de energia final (PECUE, 2009).

Cabe destacar que a valorização de CDR é fundamentalmente relevante por contribuir para o desvio de resíduos de aterro, a sustentabilidade (económica) dos sistemas de gestão de resíduos por via da dinamização do mercado e a utilização de recursos energéticos endógenos, minimizando a importação de energia primária e a dependência energética externa.

O potencial de aplicação para o CDR ou CSR, são os seguintes (Piedade e Aguiar, 2010):

- Co-combustível para combustão direta em instalações de energia;
- Co-combustível em cimenteiras (fornos de cimento);
- Co-combustível em caldeiras industriais;
- Combustível para unidades de incineração dedicadas;
- Co-combustível em unidades de incineração;
- Combustível para instalações de gaseificação dedicada.

Existem vários tipos de CDR. As tipologias podem ser definidas de acordo com a forma do produto ou de acordo com a sua origem. De acordo com a forma distinguem-se os seguintes tipo de CDR (Dias e Costa, 2006) (IPQ, 2008):

- *Fluff* – material desagregado de baixa densidade, que tem a característica de ser transportável pelo ar;
- *Pellets* – CDR produzido por aglomeração de material solto em cubo, disco ou cilindro. O diâmetro ou seu equivalente é geralmente inferior a 25 mm;
- *Briquette* – porção de CDR produzido por aglomeração de material solto na forma cilíndrica. O diâmetro ou seu equivalente é superior a 25 mm.

Os diversos setores potencialmente consumidores de CDR, estabelecem condicionantes à sua aceitação, no que respeita às suas características, tendo em conta critérios de natureza económica, de processo e ambiental. Por outro lado, o CDR produzido a partir de RU, terá de competir com o obtido de fluxos potencialmente mais viáveis, em termos de poder calorífico, caracterização química e homogeneidade, como os Resíduos Industriais Não Perigosos (RINP).

2.4 Norma Portuguesa 4486

A Norma Portuguesa (NP) 4486 de 2008, para os CDR - Enquadramento para a produção, classificação e gestão da qualidade, foi preparada pela Comissão Técnica 172 "Combustíveis derivados de resíduos e biocombustíveis sólidos", sob coordenação direta do Organismo de Normalização Sectorial/Instituto Superior Técnico, combinando os requisitos de enquadramento das classes definidas no documento CEN/TS 15359:2006 com os respetivos métodos de ensaio e gestão da qualidade (IPQ, 2008).

A Norma prevê a utilização de um conjunto de documentos normativos disponíveis a nível europeu, da CEN TC 343 "*Solid Recovered Fuels*", e encontra-se de acordo, nas partes comuns, com a legislação em vigor em Portugal (IPQ, 2008).

A NP 4486, à semelhança do Despacho n.º 21295/2009, 22 de Setembro, define por "CDR os combustíveis preparados a partir de resíduos não perigosos, cuja utilização visa a recuperação de energia em unidades de incineração e co-incineração reguladas pela legislação ambiental europeia" (IPQ, 2008).

2.4.1 Classificação

O sistema de classificação tem por base três parâmetros importantes, relativos aos principais parâmetros do CDR (IPQ, 2008):

- Parâmetro económico – PCI;
- Parâmetro técnico – teor de cloro (Cl);
- Parâmetro ambiental – teor de mercúrio (Hg).

2.4.2 Metodologia e apresentação do código de classe

O sistema de classificação do CDR é baseado em valores limite para os três parâmetros seguintes, utilizando a seguinte apresentação de dados (IPQ, 2008):

- PCI – média aritmética em base tal qual;
- Teor de cloro – média aritmética em base seca;
- Teor de mercúrio – mediana e valor do percentil 80 em base tal qual.

O mais alto dos valores estatísticos (mediana e percentil 80) numa série de dados do mercúrio determina a sua classificação (IPQ, 2008).

Cada parâmetro é dividido em cinco classes devendo ser associado um número de 1 a 5 a cada parâmetro. O código da classe consiste então numa combinação de três classificações, dado que os três parâmetros apresentam igual importância. A Tabela 2.1 apresenta o sistema de classificação para os CDR (IPQ, 2008).

Tabela 2.1: Sistema de classificação para o CDR (IPQ, 2008)

Parâmetro	Medida estatística	Unidade	Classes				
			1	2	3	4	5
Poder Calorífico Inferior (PCI)	Média	MJ/kg (t.q.)	≥ 25	≥ 20	≥ 15	≥ 10	≥ 3
Teor de Cloro (Cl)	Média	% (b.s.)	≤ 0,2	≤ 0,6	≤ 1,0	≤ 1,5	≤ 3,0
Teor de Mercúrio (Hg)	Mediana	mg/MJ (t.q.)	≤ 0,02	≤ 0,03	≤ 0,08	≤ 0,15	≤ 0,50
	Percentil 80	mg/MJ (t.q.)	≤ 0,04	≤ 0,06	≤ 0,16	≤ 0,30	≤ 1,00

2.5 Fim do estatuto de resíduo

O DL n.º 73/2011, de 17 de Junho, define que "o fim de estatuto de resíduos pode aplicar-se a determinados resíduos quando tenham sido submetidos a uma operação de valorização, incluindo a reciclagem, e satisfaçam critérios específicos a estabelecer nos termos das seguintes condições (MAOT, 2011):

- A substância ou objeto ser habitualmente utilizado para fins específicos;
- Existir um mercado ou procura para essa substância ou objeto;
- A substância ou objeto satisfazer os requisitos técnicos para os fins específicos e respeitar a legislação e as normas aplicáveis aos produtos;
- A utilização da substância ou objeto não acarretar impactes globalmente adversos do ponto de vista ambiental ou da saúde humana".

Uma das motivações para a revisão do PERSU 2020 é a regularização da classificação qualitativa do composto e eventuais procedimentos de processos de aplicação do fim do estatuto de resíduo ao CDR provenientes de RU (MAOTE, 2014).

O fim do estatuto de resíduo para o composto e/ou CDR poderá facilitar o escoamento dos mesmos e aumentar o seu valor económico, quer através do cumprimento dos critérios de qualidade para a sua atribuição, quer da potencial redução da carga administrativa associada ao seu uso, importando avaliar a possibilidade de atribuição deste estatuto, seja no quadro europeu ou apenas no quadro nacional (MAOTE, 2014b).

2.6 Taxa de Gestão de Resíduos

No âmbito dos instrumentos económico-financeiros enquanto mecanismos de incentivo ao cumprimento da estratégia e objetivos para o setor, a Taxa de Gestão de Resíduos (TGR) surge como o instrumento com maior potencial, mas também com necessidade de revisão no sentido do seu efetivo aproveitamento (MAOTE, 2014).

A TGR é um instrumento económico-financeiro que tem por objetivo interiorizar nos produtores e consumidores os custos ambientais associados à gestão de resíduos, variando o seu valor em função do tipo de gestão e destino final dado aos resíduos (ERSAR, 2014).

As entidades gestoras dos serviços de resíduos pagam a TGR à autoridade nacional de resíduos (Agência Portuguesa do Ambiente - APA) pela quantidade de resíduos depositados em aterro, mas devem repercutir o respetivo valor no utilizador final, de forma a incentivar a prevenção e redução dos resíduos produzidos (ERSAR, 2014).

O regime económico e financeiro aprovado pelo DL n.º 178/2006, de 5 de Setembro, alterado e republicado pelo DL n.º 73/2011, de 17 de Junho, fixa um conjunto de taxas no âmbito do RGGR.

Conforme disposto no n.º 1 do artigo 60.º do referido diploma, para os devidos efeitos, no sítio da APA, encontram-se divulgadas as taxas de 2013, apresentadas na Tabela 2.2 (APA, 2014c).

Tabela 2.2: Taxa de gestão de resíduos para o ano 2013 (APA, 2014c)

Descrição da taxa	2013
Taxa anual de registo SIRER/SIRAPA	28,19€
TGR	
Por tonelada de resíduos geridos em instalações de incineração e co-incineração	1,14€
Por tonelada de RU e equiparados e resíduos inertes de resíduos de construção e demolição depositados em aterros	4,27€
Por tonelada de resíduos indexados à taxa de recolha fixada na licença das entidades gestoras de sistemas de fluxos específicos	2,25€
Por tonelada de resíduos depositados em aterro de CIRVER	6,39€
Por tonelada de outro tipo de resíduos não previstos anteriormente depositados em aterro	6,39€
Taxa mínima a cobrar por entidade devedora	Não prevê atualização

Uma das medidas preconizadas no PERSU 2020 é o agravamento da taxa de deposição em aterro, via TGR, de forma a incentivar o desvio de aterro e o escoamento de recicláveis e outros materiais, tornando a TGR um instrumento de desincentivo à deposição em aterro e incentivo a práticas mais eficientes (MAOTE, 2014b).

A revisão inicial dos valores da TGR, por forma a ficar alinhada com a hierarquia da gestão de resíduos e objetivos do PERSU 2020, constava do Anteprojeto de Reforma da Fiscalidade Verde. Neste documento, foram propostos os seguintes valores da TGR para aplicação a partir do ano 2020, apresentados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3: Valores para TGR 2020 (Anteprojeto de Reforma da Fiscalidade Verde, 2014)

Operação	Intervalo TGR	Valor TGR €/t	
		Mínimo	Máximo
Aterro Direto (AD)	20 – 35€	20,00€	35,00€
Coprocessamento de resíduos em instalações industriais	5 – 7,5% de AD	1,00€	2,63€
Valorização de resíduos em TM, TB e TMB	5 – 10% de AD	1,00€	3,50€
Co-incineração	7,5 – 12,5% de AD	1,50€	4,38€
Incineração	30 – 45% de AD	6,00€	15,75€
Resíduos de TM, TB e TMB para incineração	30 – 40% de (30 – 45%) AD	1,80€	6,30€
Resíduos de TM, TB e TMB para CDR	30 – 40% de (5 – 7,5%) AD	0,30€	1,05€
Resíduos de TM, TB e TMB para aterro	30 – 40% de AD	6,00€	14,00€
Resíduos de incineração para aterro	30 – 40% de AD	6,00€	14,00€

Resíduos inertes para aterro	30 – 40% de AD	6,00€	14,00€
Fluxos específicos	20 – 30% de AD	4,00€	10,50€

Todavia, após consulta e discussão efetuada a nível nacional junto dos intervenientes e operadores deste setor dos resíduos, no que se refere à definição final da TGR alinhada com os princípios da hierarquia de gestão de resíduos, apresenta-se na Tabela 2.4 o projeto de reforma onde constam os valores que estão a ser considerados para este efeito até 2020.

Tabela 2.4: Valores para TGR 2020 (Projeto de Reforma da Fiscalidade Verde, 2014)

Operação	Intervalo TGR	Valor TGR €/t
Aterro Direto (AD)	20	20,00€
Coprocessamento de resíduos em instalações Industriais	5% de AD	1,00€
Valorização de resíduos em TM, TB e TMB	5% de AD	1,00€
Co-incineração	7,5% de AD	1,50€
Incineração	30% de AD	6,00€
Resíduos de TM, TB e TMB para incineração	30% de 30% de AD	1,80€
Resíduos de TM, TB e TMB para aterro	30% de AD	6,00€
Resíduos inertes para aterro	20% de AD	4,00€

3 Estado da Arte

3.1 Economia circular

A economia mundial tem sido construída com base num modelo linear de negócios, que agora está sob ameaça devido à disponibilidade limitada de recursos naturais. A transição de uma economia linear para a projeção de um modelo circular de negócios representa uma enorme oportunidade com vários benefícios associados, nomeadamente de impacte ambiental, social e económico (LIPOR, 2014).

O termo economia circular refere-se a um sistema de produção e consumo que gera o mínimo de perdas possível. Num mundo ideal, quase tudo seria reutilizado, reciclado ou valorizado de modo a produzir outros bens. A reformulação dos produtos e processos de produção poderia ajudar a minimizar os resíduos (EC, 2014).

A visão da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico (OCDE) para o setor dos resíduos, publicada em 2011 na análise setorial do Relatório para a Economia Verde: "Uma visão para o setor dos resíduos", define a prioridade para o estabelecimento de uma economia global circular, na qual a utilização de materiais e a geração de resíduos é minimizada e os resíduos inevitáveis são reciclados ou reutilizados quando possível ou utilizados para criar valor através de outras operações como seja a valorização energética, minimizando sempre os impactes no ambiente ou na saúde humana (UNEP, 2011) (MAOTE, 2014).

No dia 15 de Setembro de 2014, o Ministério do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia, apresentou o documento "Compromisso para o Crescimento Verde", onde fixa treze objetivos quantificados para 2020 e 2030 (MAOTE, 2014c):

- Aumentar o VAB (Valor Acrescentado Bruto) verde;
- Incrementar as exportações verdes;
- Criar postos de trabalho verdes;
- Aumentar a produtividade dos materiais;
- Aumentar a incorporação de resíduos na economia;
- Privilegiar a reabilitação urbana;
- Aumentar a eficiência energética;
- Aumentar a eficiência hídrica;
- Reduzir as emissões de CO₂;
- Reforçar o peso das energias renováveis;
- Melhorar o estado das massas de água;
- Melhorar a qualidade do ar;
- Valorizar a biodiversidade.

Para além destes treze objetivos quantificados para 2020 e 2030, o Compromisso para o Crescimento Verde formula 83 iniciativas repartidas por 10 setores e 6 catalisadores, dos quais se destacam os seguintes (MAOTE, 2014c):

- Atingir, até 2020, níveis ambiciosos de reciclagem e reutilização de resíduos;
- Reduzir de 63% para 35% a deposição em aterro dos RUB, relativamente ao ano de referência 1995;
- Aumentar de 24% para 50% a taxa de preparação de resíduos para reutilização e reciclagem;
- Assegurar níveis de recolha seletiva de 47 kg/hab.ano;
- Aumentar a produção de energias renováveis (passando de 31% - em 2020, para 40% - em 2030, o peso de fontes renováveis no consumo final de energia) e fomentar o autoconsumo de energia, atingindo 300 MW, em 2020;
- Promover o desenvolvimento de projetos-piloto de Investigação, Desenvolvimento & Inovação (ID&I) em tecnologias disruptivas com potencial impacto em termos de sustentabilidade e de eficiência no uso dos recursos.

Em síntese, o setor dos resíduos é estratégico para o crescimento verde tendo em conta o seu elevado potencial de contribuir para o objetivo global de estabelecimento de uma economia circular (MAOTE, 2014c).

3.2 Desafios na União Europeia: *waste-to-energy*

A gestão dos RU trata-se assim de um enorme desafio para a Europa. A implementação na UE da Diretiva Aterros (CUE, 1999), transposta para direito nacional através do DL n.º 183/2009, de 10 de Agosto (MAOTDR, 2009a), requer a redução de RUB para todos os Estados Membros, onde apenas um máximo de 35% da quantidade total, em peso, dos RUB produzidos em 1995, podem ser colocados em aterro, em 2020. De modo a atingir uma gestão de resíduos sustentável, deve ser cumprida a hierarquia de gestão de resíduos, onde se inclui a prevenção/redução, reutilização ou reciclagem, recuperação sob a forma de energia, e por último, a deposição de aterro (Vesterinen e Lohiniva, 2000) (Garg *et al.*, 2009).

Materiais, como papel, plástico, têxteis e madeira, que contêm um elevado poder calorífico, e que não são adequados para compostagem e não podem ser colocados em aterro, têm potencial de serem utilizados no processo de recuperação de energia (Garg *et al.*, 2009).

Diferentes processos de tratamento de RU, tais como a compostagem, digestão anaeróbia, e TMB, estão disponíveis no mercado. O TMB trata-se de uma combinação de diferentes operações mecânicas e biológicas, dependendo das características dos resíduos a tratar (Garg *et al.*, 2009).

Os Estados Membros encontram-se empenhados na recuperação de energia a partir dos resíduos, e assim atingir a meta estabelecida na Diretiva 2009/28/CE, das energias renováveis, que estabelece uma quota de 20% de energia renovável para a UE, até 2020 (Hwang *et al.*, 2014).

De modo a otimizar a gestão dos RU, uma das estratégias para a redução do volume de resíduos e aproveitamento do seu teor energético, é o tratamento térmico da fração combustível aliada à recuperação de energia (Vehlow *et al.*, 2007) (Baciocchi *et al.*, 2010). O tratamento térmico dos RU em *waste-to-energy*, designação na língua inglesa, conceito adotado pela maioria dos países desenvolvidos, em infraestruturas dedicadas, é um dos componentes de uma estratégia integrada de gestão de resíduos (Rocca *et al.*, 2012).

3.3 Objetivos do PERSU 2020

A Portaria n.º 187-A/2014, de 17 de Setembro, aprova o PERSU 2020, para Portugal continental, onde "estabelece a visão, objetivos, as metas globais e as metas específicas por Sistema de Gestão de RU, as medidas a implementar no quadro dos RU no período 2014 a 2020, bem como a estratégia que suporta a sua execução, contribuindo para o cumprimento das metas nacionais e comunitárias nesta matéria" (MAOTE, 2014b).

A implementação do PERSU 2020 deverá permitir atingir níveis ambiciosos de reciclagem e preparação para a reutilização de resíduos em Portugal continental, destacando-se as seguintes metas globais estabelecidas para 2020 (MAOTE, 2014b):

- Reduzir de 63% para 35% a deposição, em aterro, dos RUB, relativamente ao ano de referência 1995;
- Aumentar de 24% para 50% a taxa de preparação de resíduos para reutilização e reciclagem;
- Assegurar níveis de recolha seletiva de 47 kg/hab.ano.

Os princípios gerais estabelecidos no PERSU 2020 são concretizados em oito objetivos, que fundamentam o estabelecimento das metas e medidas para os RU entre 2014 e 2020 (MAOTE, 2014b):

- Prevenção da produção e perigosidade dos RU;
- Aumento da preparação para reutilização, da reciclagem e da qualidade dos recicláveis;
- Redução da deposição de RU em aterro;
- Valorização económica e escoamento dos recicláveis e outros materiais do tratamento dos RU;
- Reforço dos instrumentos económico-financeiros;
- Incremento da eficácia e capacidade institucional e operacional do setor;
- Reforço da investigação, do desenvolvimento tecnológico, da inovação e da internacionalização do setor;
- Aumento do contributo do setor para outras estratégias e planos nacionais.

A Portaria n.º 187-A/2014, de 17 de Setembro, no cenário BAU (*business as usual*) em 2020, destaca um aumento no desvio de refugos e rejeitados dos aterros, de cerca de 300 mil toneladas por

ano, através da produção de CDR. O mesmo documento prevê, para 2020, um aumento de 490 kt de material para produção de CDR devido ao incremento de capacidade de TMB (MAOTE, 2014b).

A redução da deposição de RU em aterro contempla medidas a executar durante o período de vigência do PERSU 2020, que se encontram a seguir descritas (MAOTE, 2014b):

- Desvio de recicláveis de aterro;
- Desvio de RUB de aterro;
- Eliminação progressiva da deposição direta de RU em aterro;
- Desvio de aterro dos refugos e rejeitados do tratamento de RU;
- Erradicação progressiva da deposição de RINP em aterros RU.

Os materiais recicláveis e outros materiais do tratamento de RU, nomeadamente o composto e o CDR, representam os principais fluxos de saída das unidades de triagem, de TM e de TMB. A valorização económica e escoamento dos recicláveis e outros materiais do tratamento dos RU contempla algumas medidas a executar durante o período de vigência do PERSU 2020, sendo elas (MAOTE, 2014b):

- Dinamização do mercado de materiais recicláveis;
- Criação de condições para o escoamento e valorização económica do CDR;
- Garantia do enquadramento legal para o escoamento e valorização económica do composto no solo nacional;
- Garantia do enquadramento legal do escoamento e da valorização económica do biogás com origem nos RU.

3.4 Problemática dos combustíveis fósseis

Na atualidade, devido ao aumento do preço dos combustíveis e às preocupações ambientais por parte dos responsáveis e entidades oficiais, a indústria cimenteira, tem procurado alternativas à utilização de combustível de origem fóssil.

Foi neste princípio que o Conselho Europeu de Março de 2007 aprovou como meta obrigatória uma quota de 20% para a energia proveniente de fontes renováveis no consumo energético comunitário global até 2020 (PECUE, 2009).

Neste particular da indústria cimenteira esta dispõe das melhores condições para a redução pretendida em termos dos combustíveis fósseis que utiliza com a substituição por combustíveis alternativos, pois apresenta a vantagem de no seu processo produtivo as elevadas temperaturas e longos tempos de residência no forno do clínquer, permitem a utilização de materiais residuais (com determinadas características físicas exigidas) para utilização como combustível alternativo. Em regra quase todos os materiais residuais que possuem poder calorífico elevado podem e devem ser aproveitados nesta valorização energética. Todavia e como se referiu, de modo a ser viável do ponto de vista económico o aproveitamento pretendido, os materiais residuais, nomeadamente os

provenientes de processos de tratamento ou triagem de resíduos, devem possuir características físicas adequadas - de acordo com fatores que os avaliam para este objetivo, entre as quais se destacam (Mokrzycki e Uliasz-Bocheńczyk, 2003) (Kaddatz *et al.*, 2013):

- Disponibilidade;
- Estado físico do combustível (sólido, líquido, gasoso);
- Teor dos elementos circundantes (Na, K, Cl, S);
- Toxicidade (compostos orgânicos e metais pesados);
- Composição e teor de cinzas;
- Teor de voláteis;
- Poder calorífico (de preferência superior a 8 MJ/kg);
- Propriedades físicas (tamanho da escória, densidade e homogeneidade);
- Propriedades da moagem;
- Teor de humidade.

Com 30 a 40% do total de custos, atribuídos aos custos de energia (3,3 GJ ou 120 kg de carvão por 1 tonelada de cimento), a indústria cimenteira beneficia fortemente com a utilização de combustíveis alternativos, em detrimento dos combustíveis fósseis, onde se destacam o carvão e *petcoke* (Genon e Brizio, 2008) (Tsiliyannis, 2012).

Saliente-se que um dos principais parâmetros a ser considerado em termos da viabilidade de utilização de combustível é o poder calorífico que aquele material dispõe, ou seja, a quantidade de calor libertado por combustão por unidade de peso do resíduo. Realça-se que o Poder Calorífico Superior (PCS) é aquele em que o vapor de água formado regressa ao seu estado inicial, isto é, condensa restituindo o calor de vaporização, e o Poder Calorífico Inferior (PCI), é aquele em que o calor de vaporização não é restituído, ou seja, escapa-se com os gases de combustão pela chaminé, sendo este o que se verifica nas instalações industriais. É este último, o PCI que caracteriza e viabiliza a aptidão dos materiais/resíduos para a valorização energética (Martinho *et al.*, 2011).

Após exposição dos desafios na UE sobre esta temática, dos objetivos do PERSU 2020 e da análise da problemática dos combustíveis fósseis, considera-se que é necessário também enquadrar as soluções de valorização e destino final de RU de modo a termos uma completa relação das possibilidades de tratamento e dos materiais residuais que daí resultam tendo em vista a possibilidade de valorização destes últimos enquanto combustíveis alternativos. Assim descrevem-se em seguida de uma forma sucinta os processos e as soluções mais utilizadas para o tratamento e valorização dos RU e respetivo destino final.

Porém, e no âmbito dos objetivos desta dissertação enquadra-se também neste contexto de soluções a unidade cimenteira SECIL enquanto solução adequada para utilização de combustíveis alternativos aos combustíveis fósseis, uma vez que esta indústria cimenteira, tem sido dos setores mais ativos na procura de alternativas viáveis.

3.5 Soluções de valorização e destino final de RU

Neste contexto, abordam-se de seguida as soluções que permitem dar resposta aos objetivos acima preconizados.

3.5.1 Valorização multimaterial

O DL n.º 73/2011, de 17 de Junho, define a reciclagem como sendo “qualquer operação de valorização incluindo o reprocessamento de materiais orgânicos, através da qual os materiais constituintes dos resíduos são novamente transformados em produtos, materiais ou substâncias para o seu fim original ou para outros fins mas que não inclui a valorização energética nem o reprocessamento em materiais que devam ser utilizados como combustível ou em operações de enchimento” (MAOT, 2011).

A remoção seletiva das frações dos RU com interesse para reciclagem pode assumir as seguintes modalidades (Piedade e Aguiar, 2010):

- Remoção seletiva em ecopontos;
- Remoção seletiva na origem (recolha porta-a-porta);
- Ecocentros.

A reciclagem é uma componente fundamental de qualquer sistema integrado de gestão de resíduos, e permite poupanças a nível de consumo de recursos, energia ou de espaço em aterro, redução da poluição, aumento da eficiência de outros processos, como a compostagem ou a incineração, e a possibilidade de permitir aos cidadãos uma participação ativa na melhoria da qualidade do ambiente (Martinho *et al.*, 2011).

3.5.2 Valorização orgânica

A necessidade de desviar resíduos de aterro, sobretudo a componente biodegradável devido às emissões provocadas pelo biogás (principalmente metano como um dos piores Gases com Efeito de Estufa (GEE)), conduziu ao desenvolvimento de processos de tratamento e inertização dos resíduos, com principal foco no aproveitamento e valorização das componentes residuais, atenuando os efeitos gerados e procurando desenvolver recursos que minimizem o custo da operação e gestão de resíduos (Piedade e Aguiar, 2010).

A valorização orgânica pode processar-se por compostagem (aeróbia) ou por digestão anaeróbia. Para além da vantagem resultante da produção de um composto orgânico, a valorização dos resíduos biodegradáveis (bem como a retirada dos recicláveis) reduz a quantidade de resíduos a serem conduzidos a destino final (Levy e Cabeças, 2006).

3.5.1.1 Compostagem

O DL n.º 73/2011, de 17 de Junho, define composto como sendo "a matéria fertilizante resultante da decomposição controlada de resíduos orgânicos, obtida pelo processo de compostagem ou por digestão anaeróbia seguida de compostagem" (MAOT, 2011).

A compostagem trata-se de um processo de valorização que trata a fração orgânica dos RU, através da estabilização da fração orgânica biodegradável, contribuindo para a redução dos RU a serem incinerados ou depositados em aterro (Cadena *et al.*, 2009).

Trata-se da decomposição da matéria orgânica por ação de microrganismo na presença de oxigénio e em condições controladas, que provoca a libertação de calor e uma evolução característica da temperatura, a produção de um material higienizado, estável e maturado, designado por composto (Martinho *et al.*, 2011). Durante a compostagem, a matéria orgânica é metabolizada e transformada em CO₂ e H₂O (García-López *et al.*, 2014).

O processo de compostagem, em geral, realiza-se em três fases (Levy e Cabeças, 2006):

- Pré-processamento/tratamento mecânico;
- Fermentação/tratamento biológico;
- Maturação/pós-processamento seguido, ou não, de afinação.

A compostagem permite que os resíduos sejam valorizados, reduzindo o seu tamanho e volume, obtendo-se um material final, o composto, que pode ser utilizado como fertilizante ou para correção de solos (Cadena *et al.*, 2009).

A qualidade do composto depende da qualidade do resíduo, mas também da tecnologia de compostagem e do modo de operação. A qualidade de um composto é medida através de critérios como o teor em metais pesados e materiais indesejáveis de natureza antropogénica, higienização, estabilidade e maturação (Martinho *et al.*, 2011).

Na atualidade, a compostagem é a tecnologia mais utilizada para a estabilização da fração orgânica, devido à complexidade e investimento necessários na digestão anaeróbia (Cadena *et al.*, 2009).

Encontra-se em curso a definição dos materiais a serem enquadrados dentro do conceito de "fim de estatuto de resíduo", nomeadamente para o composto/produto proveniente da recolha seletiva de orgânicos. Saliente-se que este fluxo contará para as metas de reciclagem no horizonte 2020, tendo todavia que obedecer a requisitos gerais e requisitos específicos (Silveira, 2013).

3.5.1.2 Tratamento Mecânico e Biológico

O TMB corresponde à terminologia utilizada para designar a integração de várias operações unitárias desenvolvidas em instalações de gestão de resíduos, tendo como principais etapas (conforme referido anteriormente) a pré-triagem (tratamento mecânico), compostagem (aeróbia por

pilhas ou túneis e/ou digestão anaeróbia), produção de recicláveis, CDR e composto orgânico, entre outros (Piedade e Aguiar, 2010).

Estas instalações combinam a separação mecânica de diferentes frações que compõem os RU com a estabilização da matéria orgânica recorrendo a uma estabilização por processos biológicos, nomeadamente como se referiu a compostagem aeróbia e/ou a digestão anaeróbia (Montejo *et al.*, 2013).

Na Figura 3.1 apresenta-se um diagrama de blocos de uma unidade de TMB convencional.

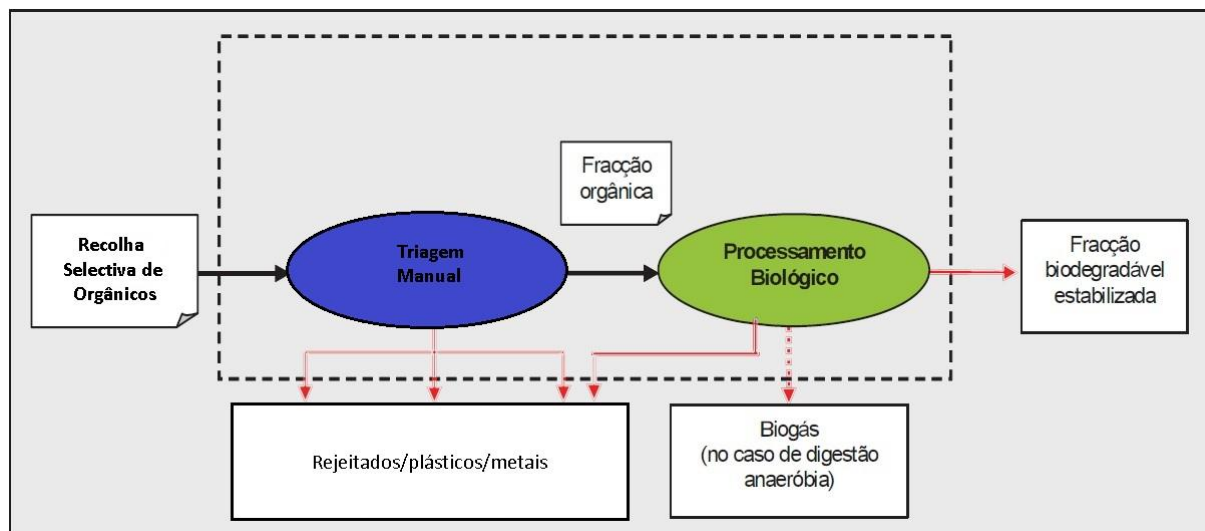


Figura 3.1: Diagrama de blocos do TMB convencional (adaptado de (Piedade e Aguiar, 2010))

Em perspetiva, os resultados do desempenho de uma unidade de TMB são os seguintes (Montejo *et al.*, 2013):

- Recuperação de materiais que podem ser enviados para reciclagem multimaterial;
- Valorização energética do biogás, através da digestão anaeróbia;
- Os refugos/rejeitados podem ser utilizados para a produção de CDR;
- A fração orgânica, após o tratamento biológico, constitui um produto estabilizado com várias aplicações.

O TMB assume-se como uma solução potencial para a concretização dos objetivos nacionais e comunitários de gestão de resíduos, em particular no que diz respeito (Piedade e Aguiar, 2010):

- Ao incremento das taxas de reciclagem por valorização multimaterial;
- Ao aumento da valorização orgânica de RUB (assumindo para tal o seu desvio de aterro);
- À redução da deposição em aterro dos resíduos não passíveis de valorização material ou orgânica (entendendo-se este como os resíduos que resultam de operações de tratamento e valorização), potenciando a sua utilização como combustíveis alternativos, suscetíveis de diminuir o recurso a combustíveis fósseis.

O processamento de RU por via da recolha indiferenciada potencia a recuperação de materiais recicláveis e a obtenção de um fluxo de materiais com aplicação como CDR, em detrimento de um produto bio-estabilizado. Também este bio-estabilizado oferece uma qualidade que poderá ser inibidora da sua utilização como composto, face à maior probabilidade de contaminação, comparativamente ao composto proveniente do tratamento biológico de resíduos provenientes de recolha seletiva de orgânicos (Piedade e Aguiar, 2010).

A Figura 3.2 apresenta o diagrama de blocos do TMB alimentado por resíduos por via da recolha indiferenciada, com particular destaque para a produção de refugos (com poder calorífico significativo) e de um produto bio-estabilizado (Piedade e Aguiar, 2010).

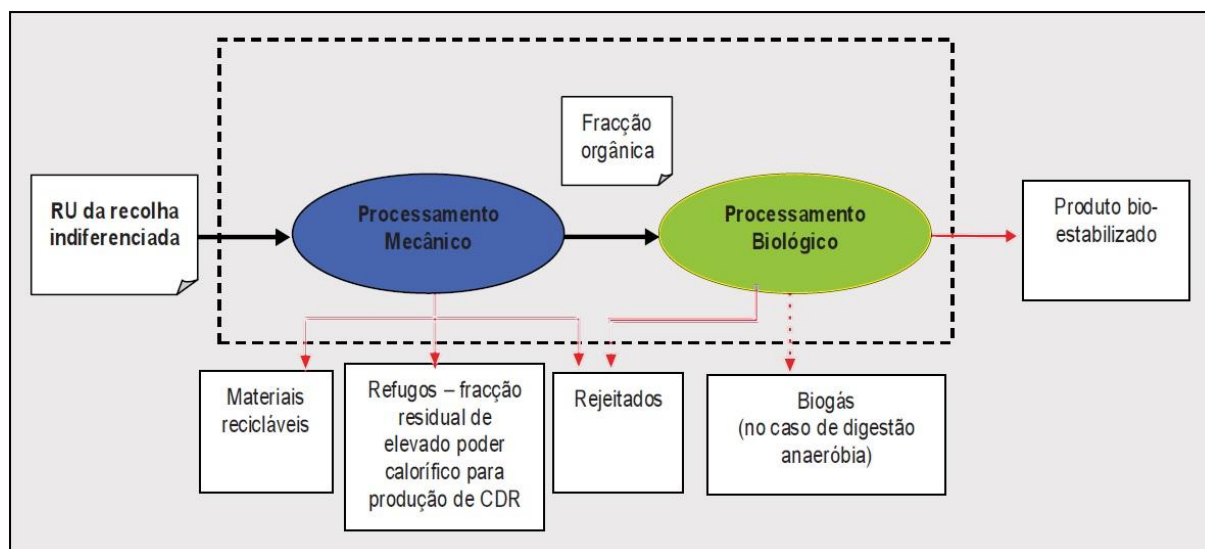


Figura 3.2: Diagrama de blocos do TMB alimentado por resíduos da recolha indiferenciada (Piedade e Aguiar, 2010)

Pelo contrário, nas instalações de TMB que recebam apenas resíduos provenientes da recolha seletiva de orgânicos, resulta uma menor quantidade de rejeitados do fluxo seletivo de RUB. Neste caso a obtenção de um produto orgânico estabilizado passa a constituir o principal objetivo com a obtenção de um composto de qualidade com maior valor comercial (Piedade e Aguiar, 2010). Por sua vez os rejeitados como apresentam um potencial de PCI baixo, a viabilidade da sua utilização como CDR para combustível alternativo é reduzida a nula.

A linha de processo de TMB é em regra concebida para produzir um produto principal valorizável ou, em determinados casos, mais do que um, designadamente (Piedade e Aguiar, 2010):

- Composto (corretivo de solos);
- CDR ou CSR em função das respetivas características;
- Biogás (quando o tratamento biológico se desenvolve em condições anaeróbias);
- Resíduo bio-estabilizado a enviar para aterro ou com potencial utilização comercial, em função das suas características organoléticas;

- Salienta-se que no período entre 1990 e 2010, foram instaladas na Europa cerca de 180 unidades de TMB, com o objetivo de reduzir a deposição em aterro da fração biodegradável, de acordo com a Diretiva Aterros.

3.5.1.3 Digestão anaeróbia

A digestão anaeróbia consiste na decomposição da matéria orgânica dos RU, realizada sem a presença de oxigénio, por meio de bactérias anaeróbias que processam os sólidos voláteis originando como produtos finais, CH₄, CO₂ e composto orgânico. Apresenta como principais vantagens, a estabilização e higienização completa dos resíduos (Levy e Cabeças, 2006).

Tendo como principal valorização o aproveitamento energético do biogás produzido nos digestores, este processo envolve um menor consumo de energia comparativamente ao processo da compostagem aeróbia, pois com o biogás gerado pode produzir-se energia elétrica para autoconsumo (por cogeração) e a energia térmica necessária para o aquecimento do digestor (Levy e Cabeças, 2006).

3.5.3 Valorização energética

Numa lógica de gestão integrada de resíduos, a valorização energética é uma solução que surge na sequência da valorização orgânica, apresentando-se como uma boa opção para a valorização dos refugos e rejeitados provenientes dos processos de tratamento mecânico e triagem/reciclagem (Martinho *et al.*, 2011).

De seguida caracterizam-se as tecnologias de valorização energética de RU.

3.5.2.1 Incineração

O DL n.º 85/2005, de 28 de Abril, define uma instalação de incineração como "qualquer unidade e equipamento técnico, fixo ou móvel, dedicado ao tratamento térmico de resíduos, com ou sem recuperação da energia térmica gerada pela combustão, incluindo a incineração de resíduos por oxidação e outros processos de tratamento térmico, como a pirólise, a gaseificação ou os processos de plasma, desde que as substâncias resultantes do tratamento sejam subsequentemente incineradas, abrangendo-se nesta definição (MAOT, 2005):

- O local e toda a instalação de incineração, incluindo todas as linhas de incineração, áreas de receção, armazenamento e meios de tratamento prévio dos resíduos no local;
- Os respetivos sistemas de abastecimento de resíduos, combustível e ar;
- Os fornos, as caldeiras e o equipamento destinado ao tratamento dos efluentes gasosos;
- Os meios, no próprio local, para tratamento ou armazenamento dos resíduos produzidos na instalação e águas residuais;
- As chaminés;
- Os dispositivos e os sistemas de controlo das operações de incineração e de registo e monitorização das condições de incineração".

A incineração consiste na oxidação do material combustível dos resíduos dando origem a calor, gases da combustão, resíduos sólidos e efluentes líquidos. É um processo de combustão controlada que tem como principais objetivos (Martinho *et al.*, 2011):

- Redução do volume até 95% (Montejo *et al.*, 2011);
- Recuperação de energia;
- Estabilização dos resíduos.

Do ponto de vista operacional, as principais etapas do processo de incineração são as seguintes (Piedade e Aguiar, 2010):

- Pré-tratamento;
- Combustão;
- Recuperação de energia;
- Tratamento das emissões gasosas;
- Tratamento dos efluentes sólidos.

A incineração pode basear-se em diversos processos térmicos, todos eles com o objetivo de reduzir os RU transformando-os (Levy e Cabeças, 2006):

- Quer em produtos reutilizáveis (materiais e energia);
- Quer em materiais inertes;
- Quer facilmente armazenáveis (refugo), como se pode observar pela Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Processos térmicos para a recuperação de energia (Levy e Cabeças, 2006)

Processo	Produto da conversão	Pré-tratamento
Combustão	Energia sob a forma de vapor; eletricidade	Inexistente; CDR
Gaseificação	Gás pouco energético	Separação da parte orgânica; redução da dimensão das partículas; CDR
Oxidação húmida	Ácidos orgânicos	Separação da parte orgânica; redução da dimensão das partículas; CDR
Transformação do vapor	Gás medianamente energético	Separação da parte orgânica; redução da dimensão das partículas; CDR
Pirólise	Gás medianamente energético; fuel líquido; fuel sólido	Separação da parte orgânica; redução da dimensão das partículas; CDR
Hidrogaseificação	Gás medianamente energético; fuel líquido	Separação da parte orgânica; redução da dimensão das partículas; CDR

A redução esperada dos RU resultante deste processo é da ordem dos 90% em volume e 80% em peso (Levy e Cabeças, 2006).

Combustão

A combustão pode ser definida como a transformação dos RU em produtos sólidos, líquidos e gasosos, com libertação de energia calorífica. A energia produzida pela combustão é armazenada,

em parte nos resíduos da combustão e, em parte transmitida, por convecção, radiação e condução, ao sistema de incineração, ao combustível de alimentação e aos resíduos (Levy e Cabeças, 2006).

Pirólise

O processo de pirólise consiste na decomposição da matéria orgânica na ausência de um agente oxidante (O_2) (Piedade e Aguiar, 2010).

Gaseificação

A gaseificação é a conversão de um combustível sólido num combustível gasoso através da oxidação parcial da biomassa a temperaturas elevadas (Dias e Costa, 2006). O processo de gaseificação, é um processo termoquímico que converte bases de carbono combustível em mistura de gases de entrada, chamados de gás de síntese, a elevadas temperaturas e na presença limitada de oxigénio (Reichling e Kulacki, 2011).

São quatro, os tipos principais de incineradores, todos eles utilizando a combustão com excesso de ar como modo de incineração (Levy e Cabeças, 2006):

- Incineradores com sistema de combustão em massa;
- Incinerador com fornalhas múltiplas;
- Incinerador de leito fluidizado;
- Forno ciclone.

A desidratação dos RU antes da incineração é um processo muito importante, uma vez que permite reduzir a quantidade de combustível necessário para manter a combustão (Levy e Cabeças, 2006).

Incineradores com sistema de combustão em massa

Nos incineradores com sistema de combustão em massa, ou *mass burning*, os RU são depositados sobre uma grelha móvel, sendo encaminhados através da fornalha, caindo as cinzas no final da linha (Levy e Cabeças, 2006).

É um processo de tratamento que permite reduzir o peso e, de maneira mais acentuada, o volume dos resíduos através da transformação provocada pela sua combustão, constituindo, sob o ponto de vista de higiene, um dos processos mais radicais na eliminação dos resíduos (Piedade e Aguiar, 2010).

Incinerador com fornalhas múltiplas

Os RU são introduzidos pela parte superior do forno, o qual tem formas cilíndricas, composto por 4 a 14 fornalhas sobrepostas umas às outras, de forma desencontrada. Os braços mecânicos das fornalhas fazem cair os RU de um nível para outro, inferior, até à base do cilindro onde são recuperados no estado de cinzas (Levy e Cabeças, 2006).

Incinerador de leito fluidizado

O sistema de leito fluidizado é um processo de incineração aplicável aos RU, requerendo no entanto, ao contrário da incineração em grelha, uma homogeneização dos resíduos, e também uma granulometria regular e relativamente reduzida (Piedade e Aguiar, 2010).

A combustão de partículas em leito fluidizado é uma tecnologia particularmente adequada para a queima de combustíveis "pobres", isto é, com altos teores de inertes e baixo PCI, tais como carvões com altos teores de cinzas, resíduos agrícolas e urbanos, entre outros (Dias e Costa, 2006).

Trata-se de um processo que consiste em aquecer, após a sua fluidização, uma camada de areia, com cerca de 75 cm de espessura, onde são destruídos os RU. O sistema apresenta-se na forma de um cilindro, com tubos na base que injetam ar, fluidizando a areia e produzindo um aumento de 80 a 100% de volume. Chamas auxiliares aquecem esta camada, a partir do qual, os RU podem ser introduzidos diretamente na areia. As cinzas são evacuadas pelo cimo do forno, o mesmo se passando com os gases (Levy e Cabeças, 2006).

A alimentação dos resíduos é efetuada de modo contínuo, em partículas de pequenas dimensões, da parte superior da câmara para a base, garantindo-se deste modo a sua secagem e rápida ignição (Piedade e Aguiar, 2010).

Forno ciclone

Este incinerador apresenta-se na forma de um cilindro vertical, rotativo, no interior do qual um braço fixo desloca os RU da periferia, por onde são introduzidos, até ao centro, onde são evacuados na forma de cinzas (Levy e Cabeças, 2006).

3.5.2.2 Co-incineração

O DL n.º 85/2005, de 28 de Abril, define uma instalação de co-incineração como "uma instalação fixa ou móvel que tem como principal finalidade a produção de energia ou de materiais e que utiliza resíduos como combustível regular ou adicional, ou na qual os resíduos são sujeitos a tratamento térmico com vista à respetiva eliminação, abrangendo-se nesta definição (MAOT, 2005):

- O local e toda a instalação, incluindo todas as linhas de co-incineração, áreas de receção, armazenamento e meios de tratamento prévio dos resíduos no local;
- Os respetivos sistemas de abastecimento de resíduos, combustível e ar;
- Os fornos e as caldeiras;
- Os meios para o tratamento dos efluentes gasosos;
- O equipamento, no próprio local, para tratamento ou armazenamento dos resíduos produzidos na instalação e águas residuais;
- As chaminés;
- Os dispositivos e os sistemas de controlo das operações de co-incineração e de registo e monitorização das condições de co-incineração".

Na co-incineração, que se realiza principalmente em cimenteiras e centrais térmicas, os refulos do tratamento de resíduos tipo CDR são utilizados como substitutos dos combustíveis tradicionais (Piedade e Aguiar, 2010).

3.5.4 Confinamento técnico de RU – Aterro sanitário

O DL n.º 73/2011, de 17 de Junho, define eliminação, como sendo "qualquer operação que não seja de valorização, nomeadamente as incluídas no anexo I do presente DL, ainda que se verifique como consequência secundária a recuperação de substâncias ou de energia" (MAOT, 2011).

A eliminação é a operação final da hierarquia de gestão de resíduos, pois os esforços de redução, reutilização, reciclagem (de materiais e orgânica) e valorização energética podem reduzir as quantidades de resíduos, mas permanecem sempre materiais residuais que necessitam ser eliminados em instalações apropriadas, como o aterro sanitário (Martinho *et al.*, 2011).

O DL n.º 183/2009, de 10 de Agosto, define aterro como sendo "a instalação de eliminação de resíduos através da sua deposição acima ou abaixo da superfície natural, incluindo (MAOTDR, 2009a):

- As instalações de eliminação internas, considerando-se como tal os aterros onde o produtor de resíduos efetua a sua própria eliminação de resíduos no local de produção;
- Uma instalação permanente, considerando-se como tal a que tiver uma vida útil superior a um ano, usada para armazenagem temporária".

Segundo o mesmo DL, "os aterros são classificados numa das seguintes classes (MAOTDR, 2009a):

- Aterros para resíduos inertes;
- Aterros para resíduos não perigosos;
- Aterros para resíduos perigosos".

Em Portugal, a deposição de RU em aterro originou emissões de GEE na ordem dos 2,8 milhões de toneladas de CO₂ eq. em 2011, ou seja, 34,1% das emissões do setor dos resíduos e 4,0% das emissões totais de GEE nacionais estimadas para esse ano (MAOTE, 2014).

Em 2012, do total de RU produzidos em Portugal continental (4,528 milhões de toneladas), 53,6% foram depositados em aterro. Deste total de RU produzidos, 54,5% correspondem a RUB, o que representa 2,468 milhões de toneladas, onde 59,1% foi encaminhado para aterro. Em suma, a deposição em aterro continua a ser a operação de gestão preferencial. Torna-se assim importante assegurar o cumprimento dos objetivos comunitários e nacionais em matéria de desvio de RUB de aterro, encaminhando-os para valorização orgânica e contribuindo desta forma para diminuir as emissões de GEE com origem no setor dos resíduos (APA, 2013).

O PERSU 2020, na visão para a gestão dos RU, preconiza a eliminação progressiva da deposição de resíduos em aterro, erradicando a deposição de materiais recicláveis e compostáveis, com vista à erradicação da deposição direta de RU em aterro até 2030 (MAOTE, 2014).

3.6 Combustível Derivado de Resíduos

O CSR é referido como um CDR com propriedades e critérios de qualidade definidos, em CEN/TS 15359:2006 Combustíveis Sólidos Recuperados - Especificações e Classes (Ma *et al.*, 2010).

Entre as diversas características do CDR, destacam-se as mais relevantes:

- O CDR proveniente de TMB é cerca de 67% em volume da fração inicial de RU, e que normalmente vai para aterro;
- O CDR mostrou ser um melhor combustível comparativamente aos RU, pois o seu PCI é o dobro, podendo ainda ser alcançado um acréscimo na recuperação de energia, se forem realizadas melhorias no processo de remoção da matéria orgânica do TMB, pois esta fração apresenta um baixo poder calorífico e cerca de 40 a 50% de humidade (Chyang *et al.*, 2010) (Montejo *et al.*, 2011);
- Antes de serem incinerados, os RU são classificados com base na sua capacidade de combustão, onde os materiais que apresentem maior poder calorífico serão utilizados para a produção de CDR (Dong e Lee, 2009);
- O CDR é produzido através do refugo dos RU, triado por tamanho, separado com base no peso, e triturado. Posteriormente é caracterizado através de uma distribuição constante de tamanho e composição, que consiste em frações com elevado poder calorífico, tais como, papel e cartão (50 a 60% em peso), plásticos (20 a 30 % em peso), assim como têxteis e borracha (10 a 15 % em peso) (Rocca *et al.*, 2012);
- O CDR produzido a partir de RU apresenta inúmeras vantagens, tais como, elevado valor de aquecimento que se mantém relativamente constante, a homogeneidade na composição físico-química, a facilidade de armazenamento, manuseamento e transporte, a baixa emissão de poluentes e a menor necessidade de excesso de ar durante a combustão (Caputo e Pelagagge, 2002) (Chang *et al.*, 1998) (Gupta e Rohrbach, 1991) (Saxena e Rao, 1993).

Contudo e conforme se refere atrás, uma das limitações que se coloca ao CDR enquanto combustível alternativo é o elevado grau de humidade que tem (e que se situa entre os 40 e 50%) e que interessa diminuir para aumentar o seu PCI.

Nesta conformidade importa que o CDR disponha de um grau de humidade reduzido de modo a poder ser valorizado como um combustível alternativo nomeadamente na indústria cimenteira onde as elevadas temperaturas de incineração, a grande área que ocupa a fornalha, o comprimento significativo do forno e o ambiente alcalino dentro do forno permitem a sua utilização de forma muito favorável, quer em termos ambientais quer económicos (Mokrzycki e Uliasz-Bocheńczyk, 2003).

Assim apresenta-se em seguida uma descrição pormenorizada da cimenteira SECIL e do seu processo produtivo, para em seguida se descreverem, com base na revisão de literatura, os métodos de bio-secagem que permitem reduzir a humidade do CDR.

3.7 SECIL

Em 1904, a Fundação da Companhia de Cimentos de Portugal arrancou com dois fornos verticais para uma produção de 10.000 t/ano, na fábrica do Outão em Setúbal. No ano de 1925 é criada a marca SECIL, e entre 1930 e 1972, foram instalados sete fornos por via húmida, com uma capacidade de produção de 1 milhão de toneladas de clínquer, tornando-se na maior fábrica de cimento em Portugal (SECIL, 2014a).

A fábrica do Outão localiza-se em Setúbal, o que permite três cais acostáveis, dotados de meios autónomos de carga e descarga simultâneas. Atualmente apresenta uma produção anual superior e 2 milhões de toneladas dos vários tipos de cimento. Todo o processo de fabrico na fábrica do Outão é feito por via seca, o que, aliado à possibilidade das suas linhas de fabrico poderem queimar carvão, fuelóleo, gás e *petcoke*, lhe confere grande flexibilidade, permitindo a otimização do consumo energético e a obtenção de excelentes índices de consumo de combustíveis por tonelada de cimento produzido (SECIL, 2014b).

3.7.1 Processo produtivo de cimento

O processo de produção de cimento, de um modo geral, inclui uma pedreira, a preparação de matérias-primas, o pré-aquecimento da matéria-prima, um forno, o arrefecimento de clínquer, moagem, armazenamento e expedição (Kaddatz *et al.*, 2013).

O processo produtivo do cimento encontra-se descrito na Figura 3.3 (SECIL, 2014c):

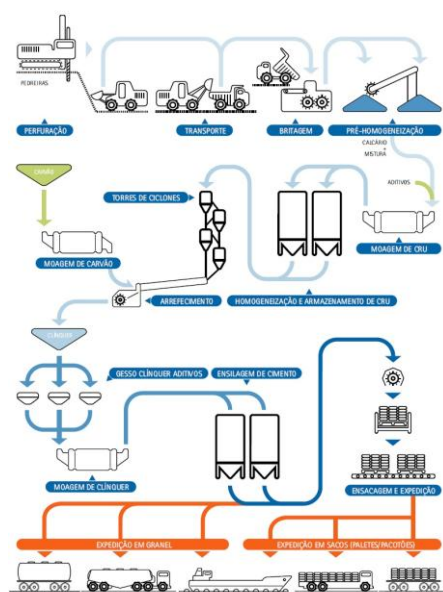


Figura 3.3: Diagrama do fabrico de cimento da SECIL (SECIL, 2014c)

3.7.1.1 Descrição do processo de fabrico do cimento da SECIL

A matéria-prima é constituída por uma mistura, em proporções bem determinadas, de calcário, marga e argila, à qual se adicionam, por vezes, materiais de correção, tais como, areia e minério de ferro (SECIL, 2014c).

O material, após extração, apresenta-se em blocos com dimensões que podem ir até cerca de 1 m³, sendo então necessário reduzir o seu tamanho a uma granulometria adequada para posterior utilização nas fases seguintes do fabrico, operação que é feita em britadores (SECIL, 2014c).

As matérias-primas seleccionadas são depois doseadas, tendo em consideração a qualidade do produto a obter, o clínquer. Definida a proporção das matérias-primas, são transportadas para moinhos onde se produz o chamado *cru*, sendo necessário secar as matérias-primas, aproveitando-se, com frequência, o calor contido nos gases de escape dos fornos (SECIL, 2014c).

O *cru* é depois cozido em fornos. Para que se desenvolva o processo de cozedura, ou clinquerização, é necessário atingir uma temperatura de cerca de 1.450 °C. Obtém-se esta temperatura pela combustão de carvão pulverizado, *petcoke*, fuelóleo, gás natural ou outros combustíveis secundários (SECIL, 2014c).

A produção de cimento, começa com o processo de calcinação, que é o processo de decomposição de carbonato de cálcio (CaCO₃) a cerca de 900 °C para deixar o óxido de cálcio (CaO, cal) e libertar CO₂. De seguida, no forno, dá-se o processo de formação de clínquer, onde o óxido de cálcio reage a uma temperatura elevada (entre 1.400 °C a 1.500 °C), com a sílica, alumina e óxido de ferro para formar os silicatos, aluminatos e ferrites, respetivamente, que constituem o clínquer. Este clínquer é arrefecido e posteriormente moído em conjunto com gesso e outros aditivos para a produção de cimento (Kaddatz *et al.*, 2013).

Para gerar a energia térmica necessária, os combustíveis são queimados no forno, assim como na torre de pré-aquecimento. O forno rotativo utilizado na produção de cimento é capaz de queimar uma gama variada de materiais, devido ao longo tempo de residência a elevadas temperaturas, à capacidade intrínseca para o clínquer de absorver e bloquear contaminantes e ao meio alcalino do forno (Kaddatz *et al.*, 2013).

O cimento resulta da moagem fina de vários componentes, sendo o componente maioritário o clínquer, juntando-se gesso e aditivos. O cimento produzido é normalmente transportado por via pneumática ou mecânica e armazenado em silos ou armazéns horizontais (SECIL, 2014c).

O abastecimento de cimento aos clientes pode ser realizado por meios automáticos de carregamento, reduzindo assim os tempos de carga. O cimento pode ainda seguir para uma máquina de ensacagem, sendo depositado em paletes ou constituindo pacotões plastificados. O cimento expedido na forma de granel é transferido diretamente do silo onde está armazenado para camiões-

cisterna, cisternas para transporte ferroviário ou para navios de transporte de cimento (SECIL, 2014c).

3.7.2 Combustíveis alternativos aos combustíveis fósseis

Tal como descrito, a etapa que apresenta um maior consumo de combustíveis, é a cozedura. Por conseguinte, é nesta etapa que deve ser considerada a utilização de combustíveis alternativos.

Combustíveis alternativos aos combustíveis fósseis, podem ser considerados os seguintes (Caputo e Pelagagge, 2002) (Genon e Brizio, 2008) (Kääntee *et al.*, 2004) (Kaddatz *et al.*, 2013) (Lechtenberg, 2009) (AVE, 2014a):

- CDR - combustível derivado da fração de refugo que resulta do tratamento de RU após remoção dos recicláveis;
- Farinhas de carne - resíduos resultantes da atividade de produção, abate e transporte animal;
- Estilha de madeira - desperdícios de madeira, quer resultantes da biomassa florestal, quer de origem urbana e para os quais não há qualquer outro destino;
- Resíduos Industriais Perigosos (RIP) - resíduos como as lamas oleosas das refinarias;
- Chips de pneu - desperdícios da reciclagem de pneus que, de outra forma, não seriam utilizados;
- Fração leve de resíduos de veículos em fim de vida - estofos e outros materiais têxteis dos veículos em fim de vida.

Na indústria cimenteira, um dos principais problemas relacionado com a utilização de CDR, é o cloro, pois quando o teor de cloro é elevado, vai enfraquecer o cimento quanto à resistência à compressão. Reações provocadas a partir de componentes com elevada toxicidade, nomeadamente o cloro, irão gerar sais, e estes sais irão gerar micro fissuras diminuindo a resistência à compressão (Kara *et al.*, 2009).

Para a SECIL, a valorização de resíduos é um processo vantajoso na medida em que há uma poupança de recursos económicos ao substituir combustíveis fósseis por combustíveis alternativos. Ao mesmo tempo diminui-se a dependência do país em combustíveis fósseis importados do exterior. Para além de resolver um problema nacional que são os rejeitados/refugos, evitam-se importações de combustíveis fósseis e ocupação de espaço em aterro. Esta substituição permite a redução do consumo de combustíveis fósseis e de matérias-primas primárias, disponibilizando estes recursos para outras aplicações.

O DL n.º 85/2005, de 28 de Abril, "estabelece o regime a que fica sujeita a incineração e a co-incineração de resíduos, com o objetivo de prevenir ou, tanto quanto possível, reduzir ao mínimo os seus efeitos negativos no ambiente, em especial a poluição resultante das emissões para a atmosfera, para o solo e para as águas superficiais e subterrâneas, bem como os riscos para a saúde humana" (MAOT, 2005).

O processamento de resíduos em fornos de cimento é um processo de destruição definitiva, conduzido de forma segura, monitorizado e em linha com os princípios da sustentabilidade ambiental (AVE, 2014b).

Na Figura 3.4 encontra-se localizado o local de introdução dos resíduos como combustível alternativo.

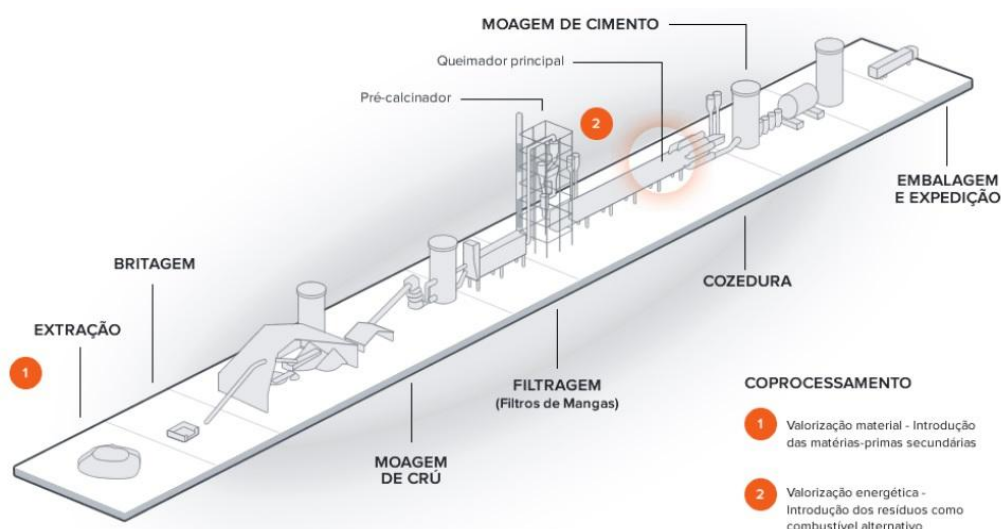


Figura 3.4: Introdução do CDR como combustível alternativo (AVE, 2014b)

O DL n.º 199/2007, de 18 de Maio, apresenta os seguintes valores de PCI para os combustíveis fósseis, que poderão ser comparados com o PCI dos combustíveis alternativos (MEI, 2007):

- Carvão = 6.250 kcal/kg = 26.168 kJ/kg;
- Fuelóleo = 9.600 kcal/kg = 40.193 kJ/kg;
- Gasóleo = 10.200 kcal/kg = 36.086 kJ/L;
- Gás natural = 9.028 kcal/m³N = 37.800 kJ/m³N.

3.7.3 Limitações na utilização do CDR

No caso da indústria cimenteira, a secagem do CDR é fundamental, pois este material possui uma humidade média de 40 a 50% sendo que o desejável seria a redução para 20% ou inferior, de modo a aumentar o seu PCI, com a finalidade de se atingir uma maior eficiência energética nos fornos do clínquer.

O teor de água no CDR é um ponto relevante no processo de incineração e co-incineração, sendo que alguns estudos demonstram uma redução na eficiência da combustão devido ao aumento do teor de humidade no CDR, assim como a sua influência na emissão de gases, tais como o CO, SO₂, NO e NO₂ (Montejo *et al.*, 2011).

Sendo a pré-secagem com recurso a energia térmica um processo oneroso que inviabiliza economicamente a utilização do CDR como combustível alternativo, na VALNOR encontra-se em desenvolvimento um estudo inovador relativo à tentativa de encontrar um processo de bio-secagem.

Caso o CDR possua um elevado teor de humidade, quando entrar no forno da cimenteira, irá reduzir a temperatura no interior do forno, temperatura esta que se deve manter constante, nos 2.000 °C, o que irá provocar uma redução drástica da eficiência do processo (Sarc *et al.*, 2014).

Outra das limitações do uso de CDR, é o facto da indústria cimenteira impor uma granulometria inferior a 12 mm. Caso a granulometria seja superior, o CDR quando entrar no forno, não será nem rápida nem totalmente combustado (Sarc *et al.*, 2014).

Em seguida, descrevem-se os diferentes métodos utilizados na bio-secagem do CDR.

3.8 Métodos para a redução da humidade

Na utilização de resíduos como combustível alternativo, devem ser tidos em conta vários parâmetros, sendo os mais relevantes, o tamanho da fração combustível (orgânica) e o teor de humidade (Mokrzycki e Uliasz-Bocheńczyk, 2003). É neste particular do teor de humidade que importa intervir pois a redução desta permite um aumento significativo do PCI, nomeadamente no CDR gerado após tratamento mecânico biológico e triagem.

Nesta conformidade importa que o CDR disponha de um grau de humidade reduzido de modo a poder ser valorizado como um combustível alternativo nomeadamente na indústria cimenteira onde as elevadas temperaturas de incineração, a grande área que ocupa a fornalha, o comprimento significativo do forno e o ambiente alcalino dentro do forno permitem a sua utilização de forma muito favorável, quer em termos ambientais quer económicos (Mokrzycki e Uliasz-Bocheńczyk, 2003). Para a redução da humidade do CDR encontram-se em desenvolvimento vários métodos a nível nacional internacional e que se descrevem em seguida.

3.8.1 Bio-secagem

A bio-secagem corresponde a um processo de secagem (diminuição da humidade) através da evaporação convectiva, utilizando o calor da biodegradação aeróbia dos resíduos e também a introdução de fluxo de ar. O teor em humidade é reduzido através de dois passos (Velis *et al.*, 2009):

- As moléculas de água evaporam (passam da fase líquida para a fase gasosa) da superfície dos resíduos para o ar circundante;
- A água evaporada é transportada através de um fluxo de ar e removida com as emissões gasosas de escape.

O processo de bio-secagem é mais utilizado nos RU, a montante do TMB, pois o facto de os RU entrarem no TMB com um menor teor de humidade, irá aumentar a eficiência do processo.

Os RU apresentam um elevado teor de humidade, devido à quantidade de resíduos biodegradáveis que os compõem (Cheng *et al.*, 2007) (Shao *et al.*, 2010) (Zhang *et al.*, 2008). Por este motivo, nos RU torna-se difícil realizar uma combustão auto-sustentada, e a eficiência da recuperação de energia é limitada pelo PCI (3 - 6,7 MJ/kg) (Cheng *et al.*, 2007) (Norbu *et al.*, 2005) (Shao *et al.*, 2010) (Patumsawad e Cliffe, 2002).

A bio-secagem é uma variação à decomposição aeróbia, muito utilizada em TMB para secagem e estabilização parcial dos RU (Velis *et al.*, 2009).

O tema da bio-secagem foi introduzido em 1984 por Jewell, referindo-se aos parâmetros operacionais da secagem de estrume (Jewell *et al.*, 1984) (Velis *et al.*, 2009).

A bio-secagem pode remover água através de ventilação e calor produzidos a partir da biodegradação (Dufour, 2006) (Shao *et al.*, 2010) (Velis *et al.*, 2009), tendo sido dos métodos mais utilizados para redução do teor de humidade dos RU (Rada *et al.*, 2007) (Shao *et al.*, 2010) (Zhang *et al.*, 2008). Deste modo, a secagem biológica na etapa de pré-tratamento irá melhorar a queima dos RU (menor conteúdo em água e maior PCI), assim como irá melhorar a eficiência de separação dos RU, aumentando assim o potencial de produção de CDR (Shao *et al.*, 2010).

Através da secagem biológica, pretende-se pré-tratar os resíduos com o menor tempo de residência possível de modo a produzir um CDR de elevada qualidade, com recurso aos seguintes processos (Velis *et al.*, 2009):

- Aumento do teor energético (Adani *et al.*, 2002), maximizando a remoção da humidade presente nos resíduos e preservando o poder calorífico dos compostos químicos orgânicos através da degradação biológica mínima;
- Facilitar a incorporação do conteúdo biogénico no CDR.

3.8.1.1 Métodos de bio-secagem

A bio-secagem reduz o teor de humidade do CDR enquanto preserva o seu poder calorífico, através da redução do seu conteúdo em água, o que se traduz num aumento do poder calorífico entre 30 a 40% (Adani *et al.*, 2002).

A tecnologia de bio-secagem continua a ser objeto de pesquisa e desenvolvimento, e ainda se encontra em fase de compreensão e otimização (Velis *et al.*, 2010). Na VALNOR, encontram-se em desenvolvimento ensaios de bio-secagem, que sejam eficientes e que apresentem menores custos, sendo eles:

- Bio-secagem em túneis de compostagem;
- Bio-secagem com recurso a telas com características específicas.

3.8.1.2 Bio-secagem em túneis

Uma das tecnologias mais avançadas de compostagem, é a compostagem (aeróbia) em túnel. Consiste num sistema modular e o número de túneis e as suas dimensões dependem da produção de resíduos. As dimensões dos túneis variam, entre 15 a 50 m de comprimento e 4 a 8 m de largura. A altura dos resíduos no interior dos túneis é da ordem de 2 a 2,2 m. O sistema funciona com injeção de ar a partir da base, possibilidade de adição de água e os túneis são carregados e descarregados por processos manuais ou automáticos. Este sistema é considerado mais avançado porque permite a medição da temperatura dos resíduos e a concentração do oxigénio em tempo real (Martinho *et al.*, 2011).

A ventilação é realizada através da insuflação contínua de ar, a partir da base do túnel. O túnel é mantido húmido e sob pressão de modo a prevenir a propagação de odores na área circundante (Boldrin *et al.*, 2011).

O processo de bio-secagem da fração orgânica dos RU tem sido objeto de vários estudos, sendo o primeiro o de Adani *et al.*, 2002, seguido de Sugni *et al.*, 2005. O ensaio laboratorial levado a cabo por Adani *et al.*, 2002 (Adani *et al.*, 2002), utilizando um reator (túnel), decorreu com três diferentes temperaturas da biomassa, através do controlo do fluxo de ar. Os autores observaram que a biodegradação e a bio-secagem eram inversamente relacionadas, pois uma bio-secagem rápida resultou numa baixa estabilidade biológica, e um aumento do fluxo de ar produziu baixas temperaturas, e vice-versa (Zawadzka *et al.*, 2010).

Sugni *et al.*, 2005 (Sugni *et al.*, 2005), no mesmo reator (túnel) utilizado por Adani *et al.*, 2002, estudaram os gradientes de temperatura e humidade durante o processo de bio-secagem, com intervalos irregulares no decorrer da simulação de inversão de fluxo de ar, constatando que a gestão apropriada de todos os parâmetros do processo, como o fluxo de ar e temperatura da biomassa, podem conduzir a um curto tempo de bio-secagem (Zawadzka *et al.*, 2010).

Ambos os estudos demonstraram que tanto a falta de homogeneidade, como no fornecimento de ar numa única direção, contribuíam para o aparecimento de gradientes de temperatura, resultando num produto final pouco homogéneo em termos do teor de humidade e poder calorífico (Zawadzka *et al.*, 2010).

Zawadzka *et al.*, 2009, elaborou um estudo com base no artigo de Adani *et al.*, 2002 e Sugni *et al.*, 2005, onde o objetivo foi a construção de um túnel de secagem para levar a cabo o processo de secagem de RU com elevado teor de humidade, permitindo obter um biocombustível com elevado poder calorífico. No túnel horizontal ocorreu uma redução de 50% do teor de água, e foram atingidas temperaturas na ordem dos 53%, apesar do *input* de fluxo de ar ser de 30%. O produto final foi submetido ao processo de pirólise a elevada temperatura, confirmando que o material pode ser utilizado com combustível alternativo (Zawadzka *et al.*, 2009).

O processo de bio-secagem em túnel requer uma instalação de média a grande capacidade, com elevados custos de investimento (Cadena *et al.*, 2009).

Todavia este método torna-se favorável quando se dispõe de uma unidade de tratamento mecânico- biológica, onde o processo de fermentação da componente biodegradável é com recurso a túneis. Com efeito, nesta situação podem-se utilizar alguns dos túneis para a bio-secagem do CDR (evitando-se a construção específica de túneis para esta operação), ficando deste modo os custos de investimento fundamentalmente alocados ao tratamento biológico, passando a bio-secagem do CDR (nos túneis) a ficar associada a um custo marginal.

3.8.1.3 Bio-secagem com telas

À semelhança da compostagem, o CDR é colocado numa pilha, e é coberto por uma tela, tipo gore cover que impede a entrada de água, protegendo da chuva, mas que permite a saída da água que evapora (Cadena *et al.*, 2009).

A bio-secagem distingue-se da compostagem, pois reduz o teor de humidade, tentando preservar a maior parte da biomassa da matriz de resíduos, em vez de estabilizá-la totalmente (Velis *et al.*, 2009).

O processo de bio-secagem com telas deve ser gerido com alguma atenção de forma a acelerar a secagem do CDR e reduzir a degradação da matéria orgânica (de modo a manter o poder calorífico). A ventilação influencia a temperatura do processo do CDR, enquanto que o grau de degradação da matéria orgânica afeta o poder calorífico e o nível de estabilidade do produto final (Adani *et al.*, 2002).

Comparativamente com o processo de bio-secagem em túnel, a utilização das telas requer uma menor área, que pode ser a céu aberto e não necessita de equipamento complexo (Cadena *et al.*, 2009).

3.8.2 Outros métodos de secagem

A secagem tem como objetivo a redução do teor de humidade num material por ação da energia térmica, de modo deixar o material seco, tornando-o num produto mais atrativo (Dufour, 2006).

3.8.2.1 Secagem térmica

A secagem térmica tem como objetivo o aumento do poder calorífico do CDR, e a redução de CO₂ nos combustíveis primários, como gás ou petróleo. O CDR apresenta-se com um teor de humidade entre 40 a 50%, ou superior, e vai ser encaminhado diretamente para um secador, onde um fluxo de ar quente irá evaporar a humidade, reduzindo a humidade para cerca de 10%. Após esta secagem, o CDR é introduzido no forno e queimado.

A indústria cimenteira tem procurado soluções complementares à bio-secagem, com o objetivo de obter um CDR com um teor de humidade na ordem dos 10%.

Já se encontram desenvolvidas algumas tecnologias que aproveitam o calor do forno, de modo a reduzir o teor de humidade do CDR, entre elas, destacam-se as tecnologias das empresas STELA e ANDRITZ.

Também se encontram em desenvolvimento alguns projetos piloto de secagem térmica, na Polónia e Reino Unido, com resultados bastante satisfatórios, a saber:

- **Equipamento da STELA – Sistema através de cinta transportadora**

No processo de secagem térmica, o CDR é alimentado continuamente a baixa temperatura através de uma cinta transportadora e dois parafusos de transporte que distribuem o CDR em toda a largura da cinta nivelando o material. A profundidade do leito adequado é variável e ajustável e pode ser adaptada aos respetivos requisitos de forma rápida.

Depois da distribuição, o CDR é transportado para a zona de secagem por meio do alimentador de cinta. Dentro do túnel secador, o ar quente gerado flui através do CDR. O ar quente é gerado por meio de um permutador de calor a partir do meio de aquecimento disponível. Durante o processo o ar quente flui através da camada de resíduo, a humidade é removida por convecção e passada para o fluxo de ar, que arrefece pela retirada do calor necessário.

O caudal de ar pode ser medido ao longo do comprimento total e portanto, ajustar-se da melhor forma para a secção de secagem respetiva. Vários ventiladores radiais (sistema multiventilação) proporcionam uma medição exata do ar ao longo do comprimento total da cinta onde se processa a secagem. É necessário muito mais ar na zona de alimentação (zona molhada) do que na zona de descarga. Uma adaptação a estas exigências utiliza o ar de secagem, de forma muito eficaz e aumenta a eficiência.

A fim de obter um resíduo seco, o mais homogéneo possível, a camada de CDR é deslocada e misturada de uma forma controlada, depois de metade do comprimento da cinta, por meio de um dispositivo de viragem. Assim, existe um equilíbrio entre a camada superior seca e a camada inferior relativamente húmida. Isto garante um CDR seco de forma homogénea no ponto de saída do secador.

A humidade do produto na saída do secador é controlada e monitorizada por medição contínua. A velocidade da cinta é variável através de um motor com variação de frequência controlada e adaptada para diferentes humidades iniciais. A velocidade da cinta e, consequentemente, o rendimento diminui com alto teor de humidade, enquanto a velocidade da cinta aumenta com o aumento da taxa de transferência para humidades iniciais mais baixas. Este controlo garante uma humidade constante do produto seco e melhor utilização da energia térmica fornecida.



Figura 3.5: Equipamento de secagem térmica da STELA (STELA, 2014)

- **Equipamento da ANDRITZ – Sistema de tubo cilíndrico "tipo trommel"**

Neste processo o CDR húmido é seco com ar pré-aquecido em que a unidade de aquecimento é colocada na frente do tambor rotativo. Pode-se utilizar uma fonte de calor externa como os gases de escape dos motores de produção de energia elétrica, com passagem direta ou indireta (permutadores de calor) do calor por dentro do tambor. O fluxo de ar aquecido no tambor rotativo atinge uma gama de temperaturas de 230-300 °C. A tecnologia é caracterizada por uma "lavagem turbulenta" de CDR com o ar quente.



Figura 3.6: Equipamento de secagem térmica da ANDRITZ - Sistema de tubo cilíndrico "tipo trommel" (ANDRITZ, 2014)

O ar de processo pode ser limpo de poeiras através de um ciclone. A humidade do ar pode ser reduzida por condensadores ou purificadores de odores.

Em suma, na secagem térmica o que se pretende é obter um fluido térmico, preferencialmente que seja de custo residual, e utiliza-lo para redução do teor de humidade do CDR.

3.8.2.2 Biogás

Os RU depositados em aterro, sofrem ao longo do tempo um conjunto de transformações devidas a fenómenos físicos, químicos e biológicos, que, em resultado da elevada quantidade de materiais biodegradáveis, originam efluentes residuais líquidos e gasosos que importa controlar. Com efeito,

após a deposição destes resíduos em aterro, inicia-se de imediato a sua decomposição (Cabeças, 2012).

Desta decomposição, forma-se um efluente residual gasoso designado por – biogás – que é constituído por metano (CH_4), que representa 50 a 60%, dióxido de carbono (CO_2), que participa com 20 a 40% do volume, e gases residuais até 5%, tal como o gás sulfídrico que pode chegar a 1,5% (Levy e Cabeças, 2006).

É durante a exploração do aterro que ocorre a maior produção de biogás. Neste período a produção do biogás atinge mais de metade do potencial que é possível estimar (Cabeças, 2012).

Se o biogás for em quantidade e se as conclusões de um estudo da viabilidade económica para o aproveitamento energético do biogás forem favoráveis, o biogás captado pode ser utilizado como combustível injetando-o num motor de combustão ou em turbinas adequadas, produzindo energia elétrica, com posterior entrega na rede elétrica nacional ou para autoconsumo, ou produção de energia térmica complementar (Martinho *et al.*, 2011).

A eficiência dos motores de combustão na produção de energia elétrica atinge atualmente um valor de 33 a 38%. Saliente-se que o aproveitamento energético do biogás gerado numa instalação de compostagem por digestão anaeróbia, pode produzir 125 kWh/t dos resíduos digeridos e em aterro sanitário 10 kWh/m³ (Levy e Cabeças, 2006).

Na ótica da secagem térmica, as instalações de processamento de resíduos que dispõem de centros eletroprodutores de energia por via do aproveitamento do biogás, seja proveniente do aterro sanitário ou da digestão anaeróbia, poder-se-á aproveitar o calor gerado pela combustão e na zona de emissão de escapes para secagem do CDR.

Contudo, quando estamos perante um aterro sanitário, importa ponderar se o investimento a efetuar em equipamento e tecnologia de secagem do CDR será viável já que a produção de biogás nesta infraestrutura, com início após os dois primeiros anos, decresce exponencialmente após o seu encerramento, em regra após 15 anos de exploração.

4 Caso de Estudo

4.1 VALNOR SA

No DL n.º 11/2001, de 23 de Janeiro, publica-se a constituição da VALNOR – Valorização e Tratamento de Resíduos Sólidos do Norte Alentejano, S. A., inserida na empresa EGF (Empresa Geral do Fomento), *sub-holding* do Grupo Águas de Portugal (MAOT, 2001).

Na Figura 4.1 encontra-se a localização geográfica da VALNOR com a cor verde.

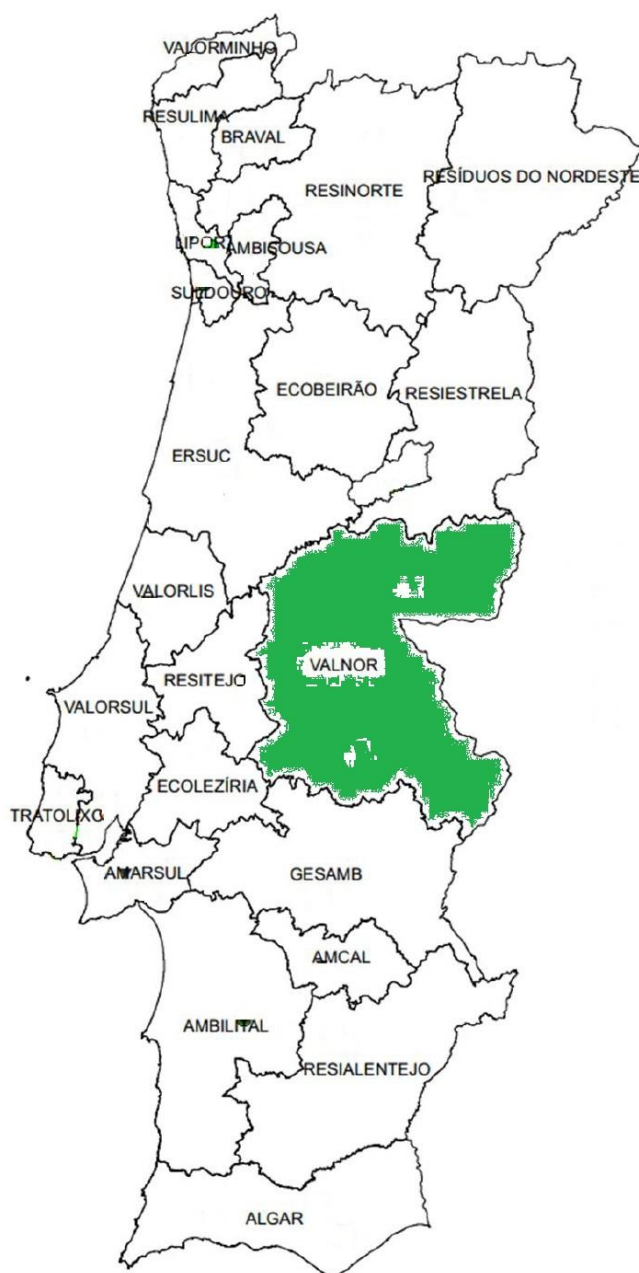


Figura 4.1: Mapa dos sistemas de gestão de RU em Portugal continental, onde se inclui a VALNOR (adaptado de (MAOTE, 2014a))

Na Figura 4.2 encontra-se o mapa de abrangência da VALNOR SA, com os 25 municípios que a constituem, que são eles: Abrantes, Alter do Chão, Arronches, Avis, Campo Maior, Castelo Branco, Castelo de Vide, Crato, Elvas, Fronteira, Gavião, Idanha a Nova, Mação, Marvão, Monforte, Nisa, Oleiros, Ponte de Sôr, Portalegre, Proença a Nova, Sardoal, Sertã, Sousel, Vila de Rei e Vila Velha de Rodão.



Figura 4.2: Mapa de abrangência da VALNOR (VALNOR, 2014b)

4.1.1 Dados de produção da VALNOR

A VALNOR apresenta uma produção de RU de 758.412 t e uma capitação de 1,2 kg/hab.dia. Na Figura 4.3 e Figura 4.4, apresentam-se os destinos diretos dos RU, e os destinos diretos dos RU, por sistemas, respetivamente (APA, 2013a).

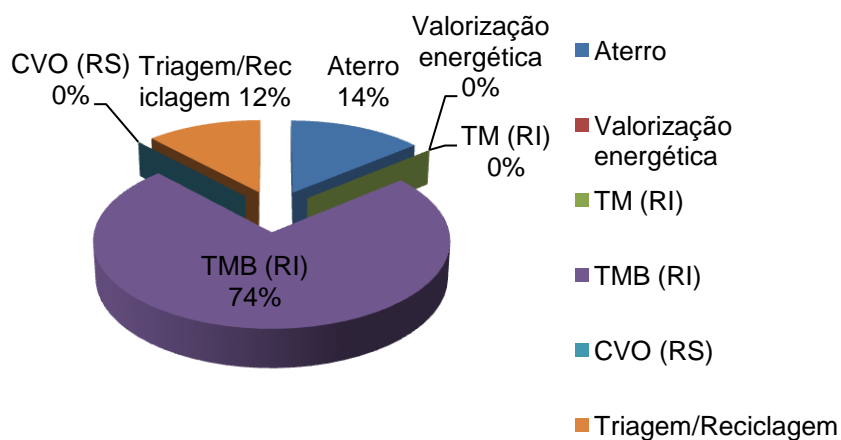


Figura 4.3: Destinos diretos dos RU, em percentagem (APA, 2013a)

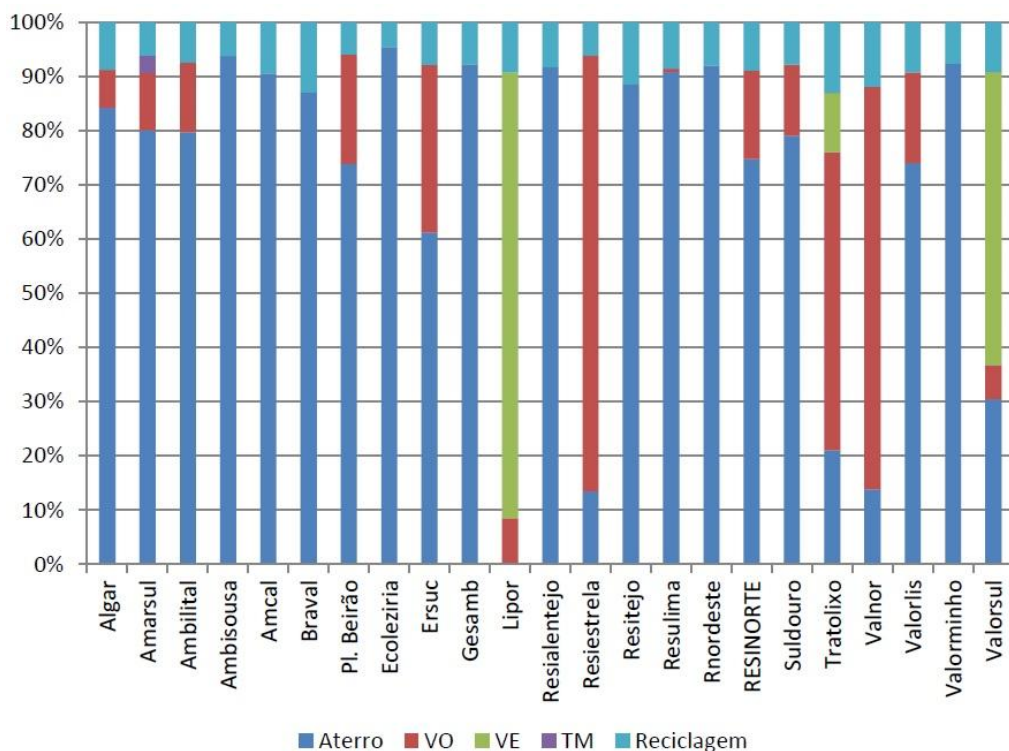


Figura 4.4: Destinos diretos dos RU, por sistema (APA, 2013a)

Através da análise da Figura 4.4, observa-se que a maioria dos sistemas mantém o aterro como destino preferencial com percentagens de aproximadamente 80%, onde pelo lado positivo e por ordem decrescente, encontram-se os sistemas Lipor, Resiestrela, VALNOR, Tratolixo e VALORSUL.

Em seguida, descrevem-se os principais dados de atividade da VALNOR:

- 109 mil toneladas de resíduos sólidos tratados;
- 27 mil toneladas de recolha seletiva;
- 486 GJ de energia produzida;
- 24 mil toneladas de composto produzido a partir de resíduos;
- 134 mil litros de biodiesel.

Tabela 4.1: Dados de produção (APA, 2013a)

Produção RU (t)	116.351
Recolha indiferenciada (t)	97.856
Recolha seletiva (t)	18.495
Capitação (kg/hab.dia)	1,20
Produção/área (t/km ²)	9,70

A partir da Figura 4.5, constata-se que nos resíduos recolhidos indiferenciadamente, em termos das principais categorias, há uma clara predominância dos biorresíduos, que representam 37%, em peso, do total de RU proveniente da recolha indiferenciada (essencialmente resíduos alimentares) (VALNOR. 2014).

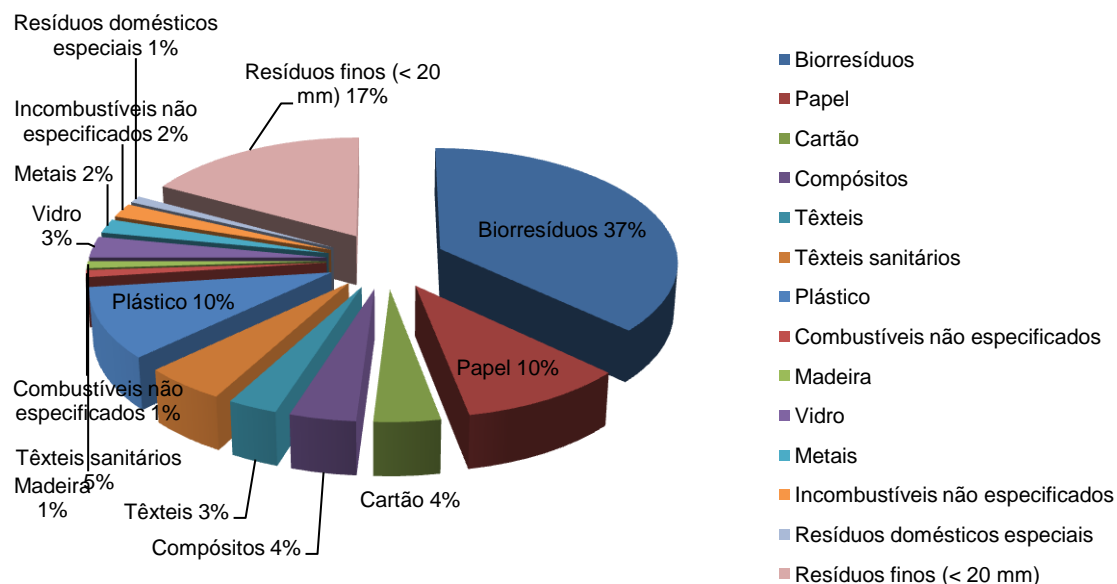


Figura 4.5: Caraterização física dos RU recolhidos indiferenciadamente na VALNOR, 2013 (VALNOR, 2013)

A segunda fração mais importante incluída nos RU recolhidos indiferenciadamente é a categoria dos resíduos finos, ou seja, aqueles cuja dimensão é inferior a 20 mm, com 17% em peso de RU. Também a categoria plásticos apresenta uma grande expressividade a par com a categoria papéis, representando cada, cerca de 10% em peso. O somatório destas quatro categorias de resíduos representa cerca de 75% dos resíduos (VALNOR, 2013).

As embalagens representam 22%, em peso. Os resíduos de embalagem encontram-se maioritariamente representados pelas embalagens plásticas e metálicas seguidas pelas embalagens de papel/cartão (papel, cartão e compósitos de cartão) e embalagens de vidro (VALNOR, 2013).

A VALNOR compreende uma área geográfica de 11.980 km² e serve uma população de 279.191 habitantes. É responsável pela recolha, triagem, valorização e tratamento de RU nos 25 municípios da sua área de influência, tendo como principal missão a preservação do ambiente onde se insere e a melhoria do serviço prestado às populações. Assumindo desde o início da sua constituição o objetivo de constituir na região um sistema integrado de tratamento de todos os resíduos e todas as fileiras, a VALNOR assume-se hoje como um sistema de tratamento e valorização de resíduos verdadeiramente integrado, através das seguintes infraestruturas (VALNOR, 2014c):

- 1.600 ecopontos;

- 350 oleões;
- Recolha seletiva em todos os concelhos;
- Aterro sanitário em Avis e Castelo Branco;
- Estação de transferência (RU) em Abrantes, Castelo Branco, Castelo de Vide, Elvas, Idanha a Nova, Ponte de Sôr, Portalegre e Proença a Nova;
- Aterro de inertes em Campo Maior e Ponte de Sôr;
- Estação de transferência de inertes em Avis, Campo Maior, Castelo Branco, Castelo de Vide, Gavião, Ponte de Sôr, Portalegre e Proença a Nova;
- Ecocentro em Abrantes, Alcains (CB), Alter do Chão, Castelo Branco, Castelo de Vide, Elvas, Fronteira, Idanha a Nova, Oleiros, Ponte de Sôr, Portalegre (2), Proença a Nova, Sertã e Vila Velha de Rodão;
- Central de triagem em Avis e Castelo Branco (pré-triagem e enfardamento);
- Central de valorização orgânica em Avis;
- Digestão anaeróbia em Avis;
- Central de preparação de CDR em Avis.

A VALNOR tem pautado a sua atividade de acordo com exigentes padrões de funcionamento, padrões estes necessários para atingir o grau de excelência, tendo vindo a consolidar um Sistema Integrado de Gestão, Qualidade, Ambiente, Segurança e Saúde do Trabalho e Responsabilidade Social devidamente certificado. Foi a primeira empresa europeia do setor de tratamento de RU a obter a certificação integrada relativamente ao Sistema Integrado de Gestão da Qualidade ISO 9001, ao Sistema de Gestão Ambiental ISO 14001 e ao Sistema de Segurança e Saúde do Trabalho OHSAS 18001. Obteve também a certificação SA 8000 referente à Responsabilidade Social e possui o Registo EMAS - Sistema Comunitário de Eco-Gestão e Auditoria, relativo à certificação de Gestão Ambiental (VALNOR, 2014d).

O caso de estudo refere-se à produção de CDR a partir dos resíduos provenientes do tratamento mecânico da CVO (Central de Valorização Orgânica), podendo ser também utilizados rejeitos provenientes da triagem de monstros e da unidade de triagem de embalagens.

Após o tratamento mecânico de RU na unidade de TMB da VALNOR, obtém-se um rejeito que representa cerca de 30% do produto tratado. Esta fração apresenta um potencial calorífico importante, uma vez que se encontra maioritariamente composta por resíduos plásticos, papel e têxteis. Após a realização de alguns ensaios técnicos, verificou-se que este material possuía um poder calorífico que variava entre os 12 e os 18 MJ/kg tq.

Estes resultados serviram de base para a assinatura de um protocolo de colaboração com a cimenteira SECIL no sentido de produzir CDR, que permitisse a sua utilização no processo produtivo do cimento.

Este protocolo estabelece que a VALNOR fará todo o escoamento de CDR para a SECIL, com a duração de 10 anos, sempre que este se encontre dentro dos limites de qualidade classificados nas classes da NP 4486:2008.

Assim, os objetivos de qualidade do CDR a fornecer são os seguintes:

Tabela 4.2: Objetivos de qualidade do CDR produzido na VALNOR (Rodrigues, 2014)

Parâmetro	Objetivo de qualidade
PCI t.q.	> 10 MJ/kg t.q.
Cloro	< 0,6%
Mercúrio	< 0,03 mg/MJ
Granulometria	< 30 mm
Humidade	≤ 22,5% (média anual) ≤ 45,0% (máximo admissível)

O PERSU 2020, preconiza as seguintes metas para a VALNOR, enquanto sistema de gestão de RU em Portugal continental (MAOTE, 2014b):

- Mínimo de preparação para reutilização e reciclagem – 80% de RU recicláveis;
- Máxima deposição RUB em aterro – 10% de RUB produzidos;
- Retomas de recolha seletiva – 54 kg *per capita* por ano.

Perante estas metas, a produção do CDR passa a ser uma prioridade mesmo sem entrar em linha de conta com o futuro valor da TGR em conformidade com o assinalado anteriormente.

4.1.2 Descrição da Central de Valorização Orgânica

A CVO iniciou a sua atividade em Outubro de 2008, tendo vindo a sofrer alterações de modo a serem desenvolvidas novas soluções no sentido de potenciar o aproveitamento de resíduos biodegradáveis e de materiais recicláveis. Na central de compostagem os resíduos orgânicos, provenientes de recolha indiferenciada ou seletiva, são submetidos a TMB.

Nesta fase os resíduos passam por diversos equipamentos (crivos rolantes, separadores balísticos e separador ótico) de forma a segregar os materiais recicláveis (papel, cartão, têxteis, vidro) e possibilitar a sua recuperação.

Os resíduos com dimensões inferiores a 80 mm, que contêm uma percentagem elevada de matéria orgânica, passam por um separador magnético para captação de metais, sendo posteriormente encaminhados para a fase biológica onde a matéria é submetida a um processo de decomposição em túneis.

As principais características da CVO encontram-se abaixo descritas:

- Área total de implantação – 40.000 m²;
- Capacidade de tratamento mecânico – 100.000 t/ano;
- Capacidade de tratamento biológico – 30.000 t/ano;
- Produção de composto – 10.000 t/ano;
- Túneis de compostagem – 9.

Na Figura 4.6 encontra-se uma representação esquemática da linha de funcionamento da CVO.

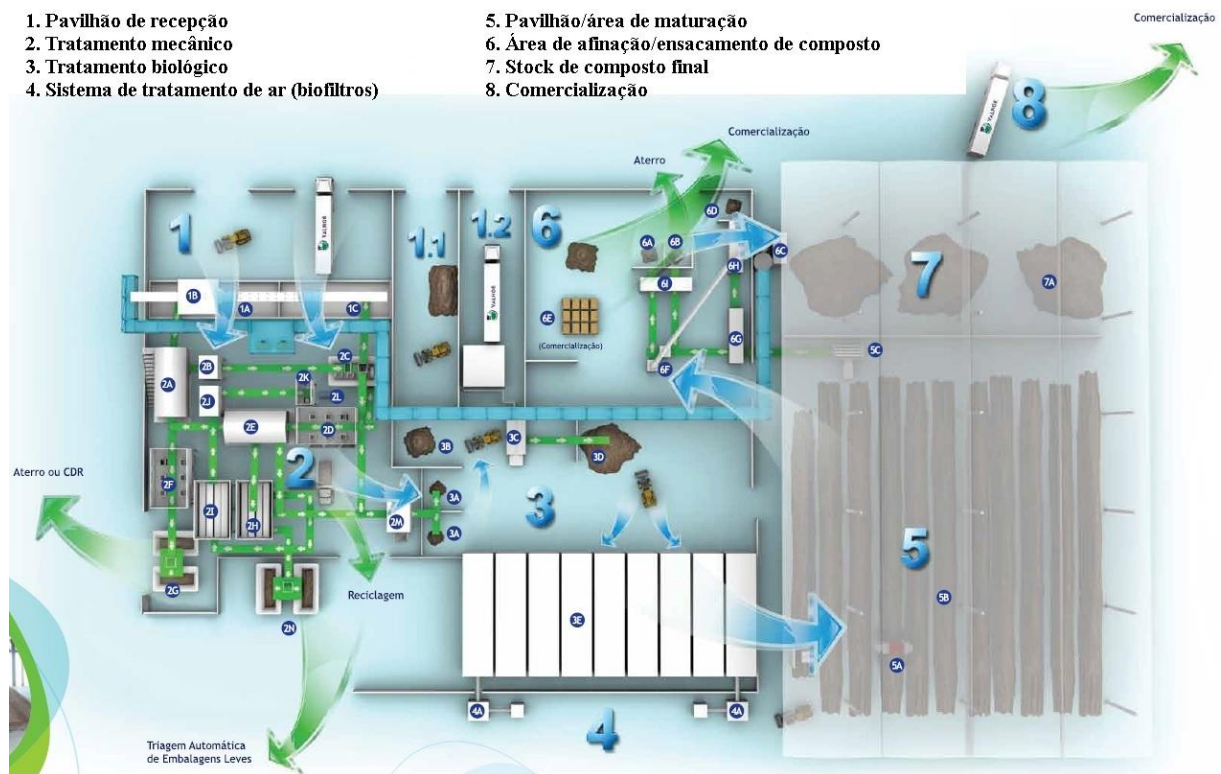


Figura 4.6: Linha de funcionamento da CVO (VALNOR, 2014d)

Legenda da Figura 4.6.

1A Fossa de receção RU; **1B** Grua de recolha; **1C** Fossa de receção RUB; **1.1** Receção – stock de material estruturante; **1.2** Receção – unidade de tratamento de lamas de ETAR; **2A** *Trommel* 300/150 mm; **2B** Triagem manual vidro/monstros; **2C** Abre sacos; **2D** Triagem manual; **2E** *Trommel* 80 mm; **2F** Triagem manual; **2G** Unidade de receção de rejeitados; **2H** Separador balístico; **2I** Balístico de afinação; **2J** Ótico de separação de filme plástico; **2K** Cabine de afinação de filme plástico; **2L** Prensa de filme plástico; **2M** Separador magnético; **2N** Unidade de embalagens; **3A** Fração orgânica; **3B** Material estruturante; **3C** Misturador; **3D** Material a compostar; **3E** Túneis de maturação (pré-compostagem); **4A** Biofiltros; **5A** Revolteadora; **5B** Pilhas em maturação; **5C** Alimentação (afinação); **6A** Composto final; **6B** Refugio; **6C** Filtro de manga/tratamento de finos; **6D** Estruturante recuperado; **6E** Sistema automático de ensacagem; **6F** Mesas densimétricas; **6G** *Trommel* 12 mm; **6H** Separador de estruturante; **6I** *Trommel* de afinação final 6 mm; **7A** Composto final

Após a pesagem, as viaturas de recolha são encaminhadas para a CVO, onde descarregam a sua carga na fossa de receção. Existe uma zona para a caracterização dos resíduos orgânicos recebidos em comunicação com a fossa de receção. A fossa está dividida em quatro partes distintas e devidamente separadas, nomeadamente:

- Transportador de alimentação de RU;
- Zona de acumulação de RU;
- Zona de acumulação de RUB;
- Transportador de alimentação de RUB. Segundo a VALNOR, está previsto a linha de RUB entrar em funcionamento em 2016 com a recolha seletiva de RUB.

O transportador de alimentação de RUB pode ser diretamente alimentado com material a partir da zona de caracterização por meio de uma pá carregadora. As restantes zonas podem ser diretamente alimentadas por um camião recorrendo a um dos portões de acesso à fossa de receção.



Figura 4.7: Garra que apanha os RU

Uma grua recolhe os resíduos existentes na fossa de receção e deposita-os no transportador de alimentação correspondente ao material que está a ser processado, RU, como se pode observar na Figura 4.7. Em situações excecionais, de indisponibilidade da grua, existe a possibilidade de descarregar o material a partir dos camiões diretamente para os transportadores de alimentação em ambas as linhas.

A separação de compostos indesejáveis é realizada através de duas linhas distintas, uma para o tratamento dos RUB da recolha seletiva e a outra para o tratamento dos RU da recolha indiferenciada. O transportador encaminha os RUB provenientes da receção e deposita-os no abre-sacos, que serve para abrir os sacos provenientes dos resíduos RUB bem como os sacos ainda fechados dos RU que não foram abertos no *trommel* 300 mm, representado na Figura 4.8, permitindo

que à saída deste equipamento o material, devidamente doseado, seja enviado para os transportadores a jusante. O *trommel* é constituído por um tambor perfurado e montado com uma ligeira inclinação. Este tambor rotativo faz com que a fração fina passe através da malha do tambor, enquanto a fração de dimensões superiores seja expelida.



Figura 4.8: *Trommel* 300 mm (VALNOR, 2014a)

Na linha de tratamento de RU os resíduos provenientes da receção são encaminhados através do transportador para o *trommel* 300 mm onde, por separação mecânica, são obtidas duas frações distintas, fração fina (inferior a 150 x 300 mm) e fração grossa (superior a 300 mm). A fração fina é encaminhada para o abre-sacos, representado na Figura 4.9 e a fração grossa para o transportador de triagem A. O tambor de crivagem do *trommel*, para além da malha que o caracteriza, contém umas facas que servem para romper os sacos ainda fechados que entram no seu campo de ação, aumentando, desta forma, a funcionalidade do próprio tambor, no sentido de encaminhar a maior quantidade possível de fração fina para o abre-sacos.



Figura 4.9: Abre-sacos (VALNOR, 2014a)

Teoricamente, se todos os RUB apresentassem um grau de pureza suficientemente razoável, em consequência de um correto processo de recolha seletiva, ao sair do abre-sacos não seriam obrigados a passar por uma fase de triagem manual. No entanto, neste momento em Portugal, a

recolha seletiva ainda não está suficientemente implementada no sentido de garantir um *input* de material para compostagem com esse tipo de qualidade.

Se os resíduos apresentarem uma qualidade mínima satisfatória são sujeitos a um separador magnético que desvia os materiais ferrosos para um contentor, enquanto o restante material é posteriormente descarregado em zonas de armazenamento distintas. Mas antes, ainda se dá um processo de pré-triagem onde se excluem os resíduos rejeitados e os materiais para reciclagem, nomeadamente, papel/cartão, plásticos e vidro.



Figura 4.10: Triagem B

Após a passagem pelo abre-sacos, os RU atravessam toda a cabine de triagem B, na Figura 4.10, onde são removidos os têxteis e papel/cartão, e dão entrada noutra *trommel* que origina duas frações distintas, fina inferior a 80 mm e grosseira superior a 80 mm. A fração fina recolhida passa por um separador magnético que desvia os ferrosos para um contentor, enquanto o resto do material destina-se à pré-compostagem. A fração grosseira é orientada para o separador balístico 1, onde é separada em três novas frações: finos, planos e rolantes. O separador balístico é constituído por um conjunto de chapas perfuradas que estão paralelas umas às outras, com uma determinada inclinação. A inclinação das chapas pretende que os materiais mais pesados, volumosos e com formato mais arredondado, materiais rolantes, sejam conduzidos para a parte inferior, por efeito da gravidade. A fração dos materiais planos, devido ao movimento das placas, desloca-se para a parte superior. A fração dos finos, que foi recuperada pelos orifícios do separador balístico, junta-se aos finos do *trommel* 80 mm e partilham o mesmo destino. A fração rolante é descarregada a jusante da cabine de triagem, passando antes por um separador magnético para remover os materiais ferrosos. Depois de descarregada na cabine de triagem a fração é sujeita a um transportador reversível giratório que permite descarregar os rejeitados em contentores de uma forma doseada e contínua, permitindo funcionar com dois contentores de modo alternado, Figura 4.11.



Figura 4.11: Rejeitados depositados em dois contentores distintos (VALNOR, 2014a)

Os planos vão para o separador balístico 2 onde se separam em três frações. Não existe diferença entre os materiais separados nos balísticos, dado que, de ambos saem fração fina, rolantes e planos, sendo que, o que varia é a forma das plataformas. A granulometria em ambos é de 80 mm, mas no separador balístico 1, a malha é redonda, e no separador balístico 2, é quadrada. A fração planos do separador balístico 1 entra no separador balístico 2, originando as 3 frações referidas. A fina dirige-se ao separador magnético com destino à pré-compostagem e a grossa dirige-se a um separador ótico. Neste, o que é filme é prensado e o que não é filme junta-se à fração grossa do *trommel* 300 mm que passa na triagem A e dá origem aos rejeitados, na Figura 4.12.



Figura 4.12: Triagem A

Uma vez terminado o processo de pré-tratamento, a fração orgânica é acumulada na zona de mistura onde permanece até lhe ser adicionada uma quantidade de fração vegetal e dar entrada nos túneis. A fração vegetal, antes de ser misturada, passa por um triturador de maneira a que a sua ação no processo de compostagem seja eficaz uma vez que apresenta as dimensões adequadas. Tendo uma fração orgânica, limpa de contaminantes, e uma fração vegetal, com dimensões devidamente reduzidas, é possível criar uma mistura. Para garantir que essa mistura seja o mais homogênea possível existe um misturador onde são depositadas as duas frações em quantidades pré-determinadas. O material que sai desta máquina está devidamente preparado para dar entrada nos túneis de compostagem.

A compostagem é um processo de biodegradação de produtos de resíduos orgânicos, tais como produtos de resíduos de origem vegetal e alimentar, que pode ser realizado na presença ou na ausência de oxigénio, aeróbio ou anaeróbio, respetivamente.

Principalmente, no início do processo são libertadas grandes quantidades de calor aumentando a temperatura do material a compostar até aos 60 °C. Contudo, devido às elevadas temperaturas, grande parte da água do composto evapora e este pode ficar demasiado seco, atrasando o processo de compostagem. Para se conseguir uma boa decomposição e para evitar maus odores, controlados por um biofiltro que consiste numa mistura de raízes de pinho cortadas, resultantes dos processos anaeróbios que se podem desenvolver, é essencial uma ventilação adequada do material a ser compostado. Numa etapa posterior são processados os compostos mais difíceis de decompor, tal como a celulose e a lenhina. Esta é a fase mais lenta e dá-se a uma temperatura aproximadamente de 50 °C. Finalmente, a matéria orgânica decompõem-se e converte-se em matéria inorgânica residual produzindo grandes quantidades de energia. Uma parte da energia é utilizada na criação de novos microrganismos. A energia que sobra é libertada em forma de calor.

Nos túneis de pré-compostagem fechada, mediante o controlo das condições interiores como a temperatura, caudal do ar e a rega, dá-se início ao processo de compostagem. Cada túnel incorpora os equipamentos e os instrumentos necessários para controlar as condições do processo. O sistema de tratamento de ar é formado por uma tubagem que capta o ar do sistema de receção de resíduos biodegradáveis, com elevado teor de humidade, tremonhas das lamas, e o da nave da carga/descarga dos túneis novos. Esta tubagem está conectada à aspiração de ventiladores centrífugos. Depois da impulsão o ar do interior de cada túnel extrai-se, individualmente, através de um orifício que irá ligar-se aos restantes ventiladores num coletor. O coletor de saída de ar dos túneis está ligado a uma das extremidades de uma câmara de ar lavado. O ar passa num biofiltro de forma a não haver contaminações quando libertado para o exterior.

Posteriormente, os resíduos orgânicos são empilhados numa zona de maturação, na Figura 4.13. O material é misturado com uma revolteadora, na Figura 4.14, em intervalos regulares, ao longo de doze semanas. Este procedimento permite a oxigenação e humidificação através de um sistema de rega incorporado. Todo o processo biológico fica concluído nesta etapa, tendo em conta que toda a matéria orgânica terá sido compostada. No entanto, estes resíduos possuem ainda materiais

contaminantes, como vidro, areias e plástico que devem ser retirados tal como outros elementos indesejados.



Figura 4.13: Pós-compostagem, maturação



Figura 4.14: Revolteadora (VALNOR, 2014a)

A afinação é um processo onde o material passa por um crivo (malha 12 mm), uma mesa densimétrica e um aspirador onde se separa a fração grosseira, material estruturante recuperado, plásticos e outros elementos indesejáveis, da fração fina, obtendo-se desta forma, o composto como produto final.

Na última etapa, denominada ensacamento, ensaca-se o produto obtido, permitindo misturar diferentes tipos de composto com vista à melhoria das suas propriedades.

Assim, a tecnologia de compostagem pretende transformar resíduos orgânicos biodegradáveis pré-tratados mecanicamente num composto final de alta qualidade, permitindo a sua comercialização para aplicações agrícolas, bem como para a floricultura.

As quantidades obtidas, em percentagem, em cada terminal da linha de funcionamento estão representadas na Figura 4.15.

Da totalidade de RU que dão entrada na CVO, o CDR que se obtém provém:

- 31% dos rejeitados do TM;
- 5% dos refugos da afinação.

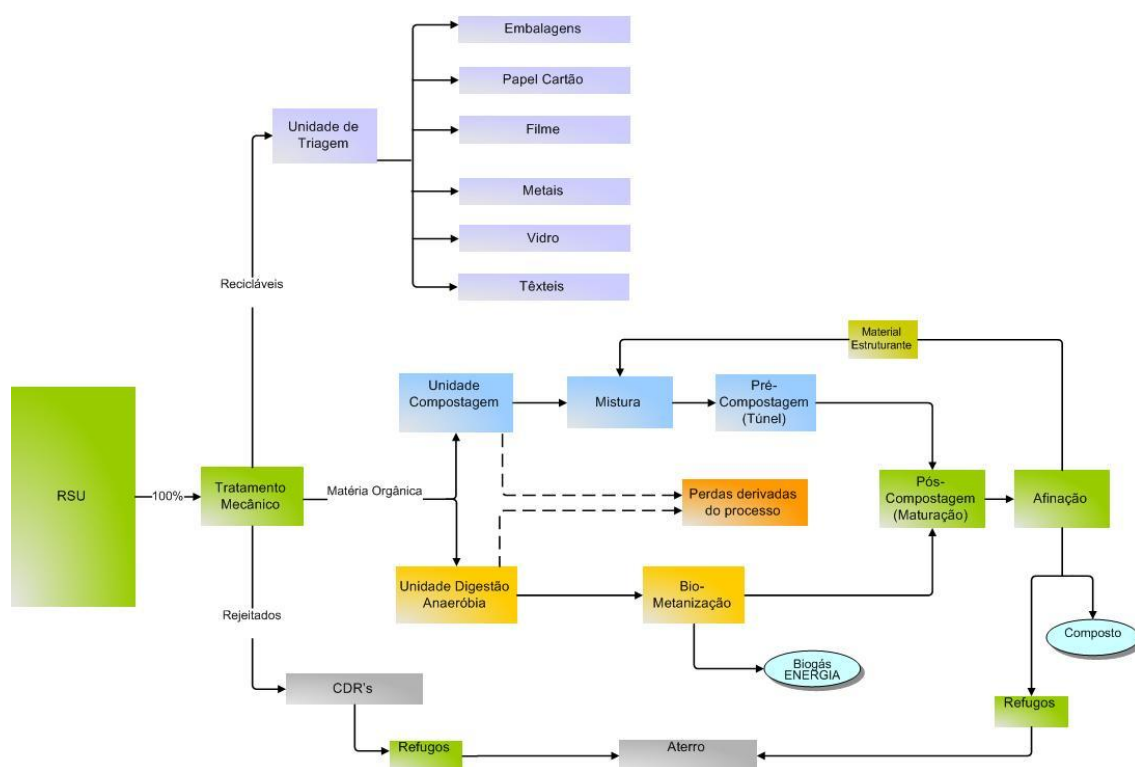


Figura 4.15: Diagrama de processo da CVO (VALNOR, 2014a)

Da observação da Figura 4.16, verifica-se que a sua composição é maioritariamente constituída pelas categorias têxteis e papéis (18%, cada) e biorresíduos (15%). Considerando a composição física do refugo da CVO, observa-se que parte dos materiais poderia ainda ser objeto de tratamento biológico. É este o caso das categorias (VALNOR, 2014):

- Biorresíduos - 15,4% (maioritariamente resíduos de jardim);
- Papéis - 17,7% (maioritariamente outros papéis não recicláveis);
- Cartões - 4,8% (maioritariamente embalagens de cartão canelado).

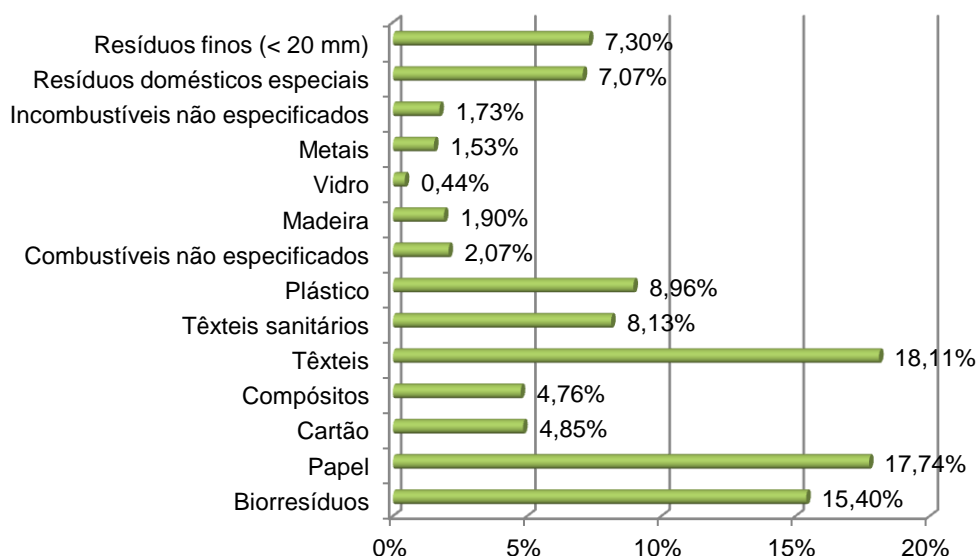


Figura 4.16: Composição física do refugo da CVO, 2013 (VALNOR, 2014a)

4.1.3 Descrição técnica da unidade de preparação de CDR

Esta unidade iniciou a sua operação no 1.º trimestre do ano de 2012, após um período de construção de nove meses, com um investimento que rondou os 3 milhões de euros (Rodrigues, 2014).

A unidade de preparação de CDR, com uma capacidade de 20 t/h, encontra-se constituída pelas zonas de: receção, armazenamento, alimentação da unidade, processamento de resíduos e armazenamento de produto acabado. O processo inicia-se com uma trituração grosseira, que garante uma granulometria inferior a 150 mm, seguidamente o material passa através de separador magnético, seguido de um separador de impróprios (materiais de maior densidade), com posterior trituração, nos trituradores secundários, que garantem uma granulometria inferior a 30 mm.

A receção dos resíduos é feita na nave onde está inserida a zona de receção, armazenamento e alimentação de resíduos, na qual os camiões efetuam as descargas.

Aqui encontra-se o equipamento móvel com garra para empilhar os resíduos na zona de receção (de forma a libertar espaço para as descargas seguintes e otimizar a área para armazenamento de resíduos) e alimentar a linha de produção de CDR. Este equipamento consiste numa máquina giratória com rodas de pneus sólidos.

A linha de tratamento de CDR está implantada numa nave adjacente, numa área designada por zona de trituração primária e secundária.

O equipamento, atrás descrito, alimenta um transportador, o primeiro equipamento da linha de tratamento de CDR, o qual é constituído por um chassis em aço, possuindo um setor horizontal de

carga, outro setor de elevação inclinado (35°), e por último um pequeno trecho reto ligeiramente inclinado.



Figura 4.17: Equipamento móvel da unidade de preparação de CDR (VALNOR, 2014a)

A velocidade deste transportador pode ser ajustada, em cada momento, para valores ótimos, em função do tipo de material que se está a processar, uma vez que este equipamento tem associado um variador de frequência.

Após elevar o material, o transportador anteriormente descrito, descarrega no triturador primário.



Figura 4.18: Triturador primário (VALNOR, 2014a)

O triturador primário está projetado para realizar uma redução dimensional primária.

Este triturador possui uma capacidade horária não inferior a 20 toneladas, para uma densidade média de resíduos de 130 kg/m^3 . A espessura média dos resíduos triturados situa-se nos 120 mm. Existe a possibilidade do ajuste individual das contra lâminas.

O triturador primário está implantado de forma a poder ser alimentado em simultâneo quer pelo transportador, atrás referido, quer pelo lado oposto (alimentação direta de resíduos volumosos, como por exemplo colchões) através de uma pá carregadora.

A alimentação através de pá carregadora será realizada a partir de uma nave adjacente, cuja área toma a designação de zona de receção de volumosos.

O material triturado é depois recolhido por um transportador de tela.

O transportador, atrás referido, é do tipo PA, o qual é composto por um chassis fabricado em chapa de aço quinada e reforçada, sobre a qual desliza uma tela de borracha resistente a lubrificantes e óleos. O cilindro superior (motriz), com diâmetro de 320 mm arqueado e coberto de borracha em forma de losango, para evitar que a tela patine ou deslize. O cilindro inferior (tensor), permite tensionar a tela, através da regulação de um fuso de varão roscado.



Figura 4.19: Transportador (VALNOR, 2014a)

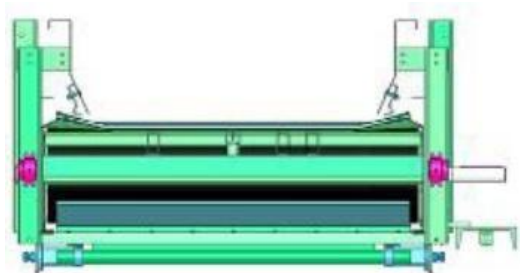


Figura 4.20: Pormenor do transportador visto em corte (VALNOR, 2014a)

Na parte inferior do transportador, estão instalados rolos com anéis de limpeza, que permitem o apoio da tela no seu retorno. O acionamento da tela é feito através de um motor redutor de grupo cónico, de eixo oco, fixado diretamente sobre o eixo do cilindro motriz. Junto ao eixo motriz é instalada uma tremonha, que descarrega para o equipamento seguinte.

Todos os transportadores possuem um detetor de rotação, um detetor de enchimento e uma caixa de comando local com chave, equipada com botoneira de paragem, arranque e comutador local/remoto.

Sobre o transportador, atrás referido, encontra-se instalado o separador de metais ferrosos, onde é feita a separação deste tipo de materiais.



Figura 4.21: Separador magnético

Este separador é constituído por um potente eletroímã que serve de estrutura principal e corpo de suporte a uma pequena tela nervurada que envolve o eletroímã.

As nervuras da tela arrastam os elementos ferrosos até os colocar fora do alcance do campo magnético gerado pelo eletroímã, onde se desprendem livremente, realizando-se desta forma a separação eletromagnética, sendo descarregados para um contentor.

O restante material segue para um transportador, tipo PA, o qual tem a dupla função de acelerar e repartir este fluxo que segue para o equipamento de separação de materiais impróprios pesados do tipo *windhopper*, o qual é utilizado para dividir o material em duas frações distintas, fração pesada e fração leve.



Figura 4.22: Separador de impróprios pesados *windhopper* (VALNOR, 2014a)

À entrada, o material é sujeito à ação de uma boquilha de injeção de ar, a qual provoca uma corrente de ar. O orifício da boquilha é ajustável, permitindo regular o ângulo de sopro. A velocidade do ar na boquilha é de 30-40 m/s e depende da secção transversal de abertura e do ajuste das rotações do ventilador.

Este equipamento dispõe de um sistema próprio para captação de poeiras com capacidade para 12.000 m³/h.

A fração leve é encaminhada para a designada "zona de calma", sendo depois recolhida por um transportador.

A fração pesada segue através de dois transportadores, ambos tipo UP.

Os transportadores tipo UP, atrás referidos, são compostos por um chassis fabricado com perfil de aço laminado a quente. O piso deslizante superior do transportador é rolante, mediante estações a 30° para a largura de tela correspondente e com os seus respetivos cilindros de série pesada. O cilindro superior (motriz), com diâmetro de 320 mm arqueado e coberto de borracha em forma de losango, para evitar que a tela patine ou deslize. O cilindro inferior (tensor), permite tensionar a tela, através da regulação de um fuso de varão roscado.

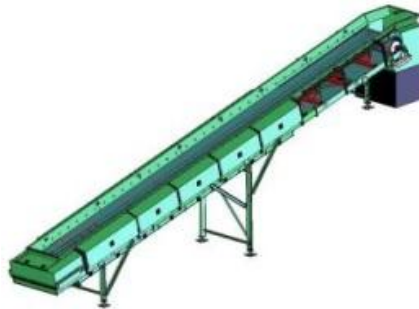


Figura 4.23: Transportador (VALNOR, 2014a)

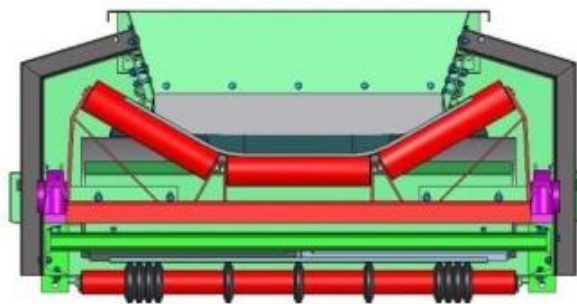


Figura 4.24: Pormenor do transportador visto em corte (VALNOR, 2014a)

Na parte inferior do transportador, estão instalados rolos com anéis de limpeza, que permitem o apoio da tela no seu retorno. O acionamento da tela é feito através de um motor redutor de grupo cónico, de eixo oco, fixado diretamente sobre o eixo do cilindro motriz. Junto ao eixo motriz é instalada uma tremonha, que descarrega para o equipamento seguinte.

Todos os transportadores possuem um detetor de rotação, um detetor de enchimento e uma caixa de comando local com chave, equipada com botoneira de paragem, arranque e comutador local/remoto.

O transportador, atrás referido, encaminha depois a fração pesada, considerada refugo, para o transportador reversível giratório (do tipo "borboleta") que distribui este fluxo ao longo de contentores de refugo de 30 m³, colocados em paralelo, situados numa nave adjacente, designada por zona de expedição, onde facilmente é possível remover/substituir os mesmos com recurso a viaturas do tipo *ampliroll*.



Figura 4.25: Transportador reversível giratório (tipo "borboleta")

Uma terceira fração, que não cai diretamente no transportador de recolha, e que não segue para a "zona de calma", é descarregada no transportador inclinado tipo "banana", que se encontra dentro do *windhopper*. Aqui, em resultado da posição, inclinação e velocidade da tela, cujos parâmetros podem ser facilmente alterados em função do material a tratar, são separadas as frações leves e pesadas, para os respetivos locais, anteriormente referidos. A possibilidade de alterar vários dos parâmetros envolvidos, garante uma enorme flexibilidade.

Relativamente à fração leve que é recolhida pelo transportador, continua através de outro transportador inclinado, tipo PA, com tela nervurada que por sua vez descarrega num transportador reversível, também tipo PA, o qual orienta este fluxo, de forma alternada, para os 2 trituradores secundários, de modo a obter a granulometria pretendida, entre 20 a 25 mm.



Figura 4.26: Triturador secundário (VALNOR, 2014a)

Os trituradores secundários considerados para este projeto são do mesmo modelo, e trabalham em paralelo, sendo constituídos por um rotor de velocidade variável, acionado por motor elétrico com transmissão de correias. Ao longo do rotor estão acopladas lâminas de aço, as quais permitem, sempre que é atingido um determinado nível de desgaste na aresta de corte, poderem ser rodadas e montadas numa posição tal, em que uma nova aresta de corte, completamente afiada, permite voltar a efetuar mais um ciclo de trabalho, sem ser necessário substituir toda a peça de desgaste.

Estes trituradores possuem também um conjunto de contra-lâminas soldadas à estrutura, bem como tremonhas de carga com um sistema que permite empurrar os resíduos para o rotor. Uma central hidráulica controla todos os cilindros hidráulicos. Na parte inferior deste, está instalada uma malha perfurada de 20 mm.

À saída dos trituradores secundários estão colocados em paralelo dois transportadores, sobre cada um dos quais está instalado um separador de metais ferrosos, de modo a retirarem eventuais elementos ferrosos que ainda circulem ao longo deste fluxo.

O material limpo é finalmente descarregado pelos transportadores, atrás referidos, num ponto de acumulação de material situado numa nave adjacente, cuja área é designada por zona de armazenamento de CDR, representado na Figura 4.27.



Figura 4.27: Zona de armazenamento de CDR



Figura 4.28: CDR – produto final

Nos pontos críticos desta instalação, nomeadamente na tremonha do triturador primário e nas tremonhas de ambos os trituradores secundários, está prevista a instalação de bocas de aspiração, ilustradas na Figura 4.29, as quais fazem parte do sistema de captação de poeiras, cuja ação consiste na eliminação das mesmas, bem como em reduzir o risco de incêndio.



Figura 4.29: Bocas de aspiração e captação de poeiras (VALNOR, 2014a)

As poeiras são depois recolhidas num filtro de mangas, o qual será instalado no exterior. Este filtro está dimensionado para tratar um caudal de 6.000 m³/h (2.000 m³/h em cada ponto de aspiração), dispondo também de um sistema ATEX, e com 2 painéis de rutura.

A soma das capacidades do filtro de mangas com 6.000 m³/h, com a capacidade do filtro do separador de impróprios pesados *windhopper* com 12.000 m³/h, perfaz um total de 18.000 m³/h.

Na Figura 4.30, apresenta-se de forma detalhada o diagrama linear do processo de preparação do CDR.

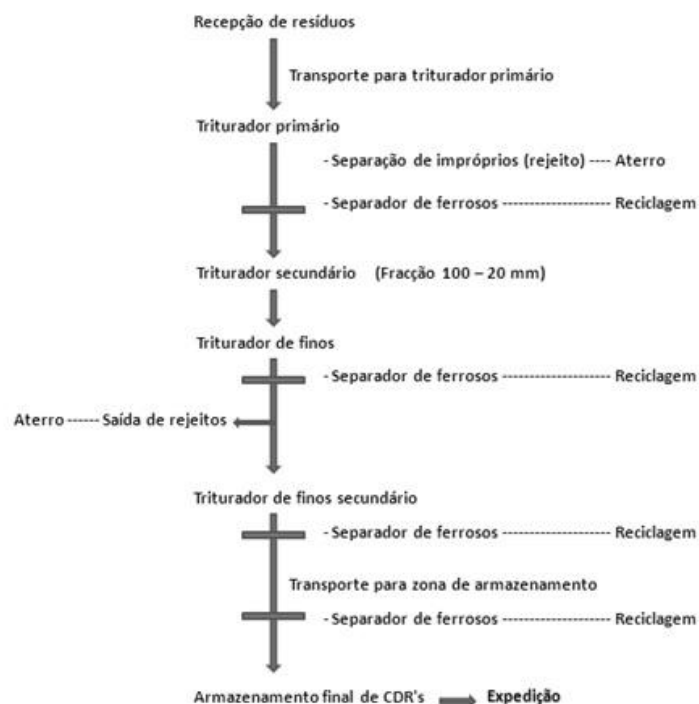


Figura 4.30: Diagrama linear do processo de produção do CDR (VALNOR, 2014a)

4.1.4 Protocolo com a SECIL

Devido ao protocolo estabelecido entre a VALNOR e a SECIL, durante os anos de 2012 e 2013 foram reencaminhadas 26.000 t de CDR para as unidades da SECIL, tendo-se obtido os parâmetros médios de qualidade descrito na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Parâmetros médios de qualidade do CDR encaminhado para a SECIL (Rodrigues, 2014)

Parâmetro	Valor médio
Humidade (%)	31,0
Cinzas (%)	14,8
Voláteis (%)	76,0
Teor de cloro (%)	0,52
PCI t.q. (MJ/kg t.q.)	12,6

Constata-se que o único parâmetro que não atingiu o valor de qualidade proposto, foi a humidade, que terá de ser reduzida para um valor inferior a 20%. Neste sentido, a VALNOR tem vindo a realizar análises laboratoriais e ensaios industriais de bio-secagem, nos quais se têm obtido resultados muito positivos, conduzindo a reduções significativas no teor de humidade.

Os ensaios realizados permitem prever que durante o ano de 2014, possam ser atingidos valores médios de humidade, na ordem dos 20%. A unidade de preparação de CDR permitiu desta forma, um

desvio de material de aterro, de aproximadamente 20% do total de RU rececionados nas instalações da VALNOR, no ano de 2013.

Prevê-se que durante o ano de 2014, com as otimizações conseguidas no que se refere à redução do teor de humidade, o desvio de material de aterro, aumente para valores na ordem dos 35%.

5 Metodologia

O principal objetivo da presente dissertação é a avaliação de diferentes métodos inovadores para a bio-secagem do CDR proveniente de TMB.

Na prossecução dos objetivos, procedeu-se à análise da redução do teor de humidade, através de diferentes processos de bio-secagem, o que possibilita a substituição de combustíveis fósseis por CDR.

Em seguida, descreve-se a metodologia utilizada na análise das amostras, bem como nos diferentes processos de bio-secagem.

5.1 Metodologia de análise às amostras

As metodologias implementadas pela VALNOR utilizadas nos ensaios de CDR regem-se por Normas internacionais em vigor ou documentos técnicos realizados com base em Normas, abaixo referidas (ECS, 2005) (ECS, 2006a) (ECS, 2006b) (ECS, 2006c) (ECS, 2006d):

- CEN/TS 15357:2006, *Solid Recovered Fuels – Terminology, definitions and descriptions*;
- CEN/TS 15359:2005, *Solid Recovered Fuels – Specifications and classes*;
- CEN/TS 15400:2005, *Solid Recovered Fuels – Methods for the determination of calorific value*;
- CEN/TS 15403:2006, *Solid Recovered Fuels – Methods for the determination of ash content*;
- CEN/TS 15414-3:2006, *Solid Recovered Fuels – Determination of moisture content using the oven dry method – Part 3: Moisture in general analysis sample*.

Conforme referido no Capítulo 1, na Figura 2.1, o sistema de classificação do CDR tem por base três parâmetros: um parâmetro económico (poder calorífico inferior), um parâmetro técnico (teor de cloro) e um parâmetro ambiental (teor de mercúrio). O CDR é ainda agrupado em classes, que são definidas por valores limite estabelecidos para determinados parâmetros do CDR escolhidos com vista à sua comercialização, bem como para fornecerem informação às autoridades e a outras partes interessadas (IPQ, 2008).

5.1.1 Ensaios de bio-secagem na VALNOR

O CDR representa uma fração importante (25 a 35%) dos resíduos indiferenciados tratados numa unidade de TMB e que resulta do refugo e rejeitados retirados na linha de triagem mecânica e no processo de afinação do composto orgânico. Este material pode ser utilizado como combustível alternativo ao combustível fóssil em centrais de co-geração e/ou cimenteiras, desde que satisfaça um conjunto de requisitos e especificações técnicas exigidas em cada processo de combustão.

No caso da indústria cimenteira, a secagem deste material é fundamental (a humidade média é de 40 a 50% e, tem de se reduzir para 20% ou inferior) de modo a aumentar o seu PCI, para maior eficiência energética nos fornos do clínquer.

Sendo a pré-secagem com recurso a energia térmica um processo oneroso que inviabiliza economicamente a utilização do CDR como combustível alternativo, na VALNOR encontra-se em desenvolvimento um estudo inovador relativo à tentativa de encontrar um processo de secagem através de duas alternativas por bio-secagem, sendo elas:

- Insuflação de ar nas pilhas formadas com CDR cobertas com uma tela, que permite a saída de ar, mas retém a entrada de ar do exterior;
- Substituição da massa de resíduos em regra colocada nos túneis de compostagem, por CDR.

Aproveitando os 9 túneis disponíveis, como referido no Capítulo 4, no primeiro semestre de 2014, a VALNOR realizou ensaios de bio-secagem. Foram realizados 11 ensaios no período compreendido entre 28 de Fevereiro de 2014 e 15 de Maio de 2014.

As amostras utilizadas nos ensaios foram principalmente provenientes do tratamento mecânico da CVO, contudo, também poderão ser utilizados rejeitos provenientes da triagem de monstros e da unidade de triagem de embalagens.

No decorrer dos ensaios foram variadas algumas condições, tais como:

- Temperatura;
- Duração do ensaio.

Como método de amostragem, a VALNOR possui um procedimento interno, que consiste na recolha de uma amostra em diferentes pontos da pilha, seguido de uma homogeneização do material.

Para o cálculo do teor em humidade, utilizou-se a metodologia de secagem em estufa, que é realizada nos laboratórios da VALNOR, tratando-se do processo de remoção de água da amostra.

Cada uma das diferentes amostras foi colocada numa embalagem apropriada para ser utilizada na estufa. Assim, o trabalho efetuado consistiu na pesagem de cada uma destas embalagens, que corresponde à tara, assim como a anotação de cada um dos pesos.

De seguida, procedeu-se à colocação das várias amostras, cada uma delas, numa embalagem diferente.

Após este passo, cada uma das embalagens contendo uma amostra foi pesada, e mais uma vez, o seu peso foi anotado.

As embalagens contendo as amostras foram colocadas na estufa, ilustrada na Figura 5.1, onde permaneceram 24 horas.



Figura 5.1: Estufa utilizada na análise do teor de humidade, localizada nos laboratórios da VALNOR

Após esse período, cada uma das embalagens contendo uma amostra foram retiradas, e foram novamente pesadas.

Por último, basta subtrair-se a tara ao peso da amostra à saída da estufa, e obtém-se o peso da amostra após 24 horas na estufa.



Figura 5.2: Pesagem das amostras antes e após secagem na estufa realizada nos laboratórios da VALNOR

A equação utilizada no cálculo do teor de humidade em percentagem, encontra-se na Figura 5.3.

Com a diferença entre as pesagens da amostra inicial e da amostra após 24 horas na estufa, obtém-se a matéria volátil, ou seja, é a perda de massa, em base seca, que ocorre quando um CDR é aquecido sem contacto com o ar, sob condições específicas.

$$Humidade (\%) = \frac{Peso_{inicial} - (Peso_{final} - Tara)}{Peso_{inicial}} \times 100$$

Figura 5.3: Equação utilizada no cálculo da humidade

5.1.2 Ensaios de bio-secagem com telas

Em paralelo aos ensaios realizados pela VALNOR, também a empresa alemã CONVAERO realizou ensaios de secagem biológica do CDR, mas com recurso a telas, nas instalações da VALNOR. Foram realizados 12 ensaios no período compreendido entre 3 de Dezembro de 2013 e 14 de Maio de 2014.

As amostras utilizadas nos ensaios da CONVAERO diferiram no número de dias, que variou entre os 10 e 29 dias, e alterou-se o input de resíduos, com diferentes granulometrias e com material triturado.

5.2 Planeamento dos trabalhos

De modo a suportar os objetivos da presente dissertação, preconizados no Capítulo 1, foram realizadas deslocações às instalações técnicas da VALNOR, localizada em Avis, com diferentes objetivos, a saber:

- Participação nos trabalhos de campo a realizar na CVO;
- Acompanhamento e colaboração na realização dos ensaios relativos aos processos de bio-secagem;
- Recolha de dados;
- Análise dos valores obtidos;
- Discussão dos resultados obtidos, em cada um dos métodos.

Esta colaboração da VALNOR com a FCT, através da minha presença para a elaboração da presente dissertação, iniciou-se a dia 6 de Março de 2014 onde ocorreu a primeira deslocação à VALNOR, que teve como objetivos:

- Assinatura do protocolo de colaboração e acordo de confidencialidade;
- Traçar um planeamento de suporte ao caso de estudo;
- Programação dos diferentes dias de deslocação;
- Acompanhamento a cada uma das unidades da VALNOR;
- Observação da CVO, assim como da unidade de preparação de CDR.

Posteriormente, em Abril, foram realizadas novas deslocções para acompanhamento, onde se realizaram trabalhos de campo na CVO, assim como a colaboração na realização dos ensaios relativos aos processos de bio-secagem, tais como:

- Processo de desgaseificação, de modo a permitir a abertura do túnel;
- Despejo do material de um túnel;
- Enchimento de um túnel, com material proveniente do túnel que foi despejado (processo equivalente a revoltar uma pilha);
- Fecho do túnel de modo a dar início à segunda fase do ensaio.

Na unidade de preparação de CDR procedeu-se à recolha de amostras para análise do teor de humidade.

Participação na realização das análises referidas, assim como acompanhamento de toda a metodologia associada à análise do teor de humidade, nos laboratórios da VALNOR.

Posteriormente, e em paralelo, acompanhou-se a realização dos ensaios, entre outros trabalhos de campo, tais como:

- Acompanhamento do ensaio de secagem de CONVAERO;
- Análise do teor de humidade, realizado nos laboratórios da VALNOR;
- Recolha de dados;
- Observação da pilha de CDR onde estava a ser retirada a tela, manuseamento do CDR já após o ensaio, e observação da sala onde se localiza o computador que regista a informação relativa ao ensaio, como a temperatura da pilha e o tempo decorrido entre o ensaio.

6 Análise e Discussão de Resultados

Com a indústria cimenteira a dar preferência a um CDR com um teor de humidade abaixo dos 20%, este fator, fez com que passasse a existir uma preocupação dos operadores de resíduos - cada vez maior - face à dificuldade em cumprir com as condições e especificações técnicas exigidas para a utilização do CDR como combustível alternativo.

Assim a preocupação virou-se para as questões económicas associadas às operações necessárias à redução do teor de humidade no CDR, de modo a viabilizar o seu escoamento em condições sustentáveis. É neste contexto que se enquadra então o recurso da VALNOR à realização de ensaios de bio-secagem, de modo a minimizar os custos associados relativamente a outros métodos mais onerosos.

6.1 Ensaios de bio-secagem realizado na VALNOR

Sendo a VALNOR um potencial produtor e fornecedor de CDR para a indústria cimenteira, a preocupação em obter um CDR de acordo com as especificações que garantam as exigências daquela indústria passou a ser um objetivo.

Na prossecução deste objetivo, e considerando o protocolo de colaboração assinado com a SECIL, a VALNOR decidiu realizar uma série de ensaios de bio-secagem nos túneis de compostagem, procurando como principal objetivo obter uma redução do teor de humidade de CDR que ali se introduziu.

Os ensaios de bio-secagem realizados nos túneis aproveitam o processo exotérmico que se inicia com a decomposição e degradação das componentes orgânicas e biodegradáveis ainda presentes/agarradas nos refugos que faz com que a temperatura na pilha de CDR aumente, resultando na evaporação do teor de água - e consequentemente na redução do teor de humidade para valores inferiores aos iniciais, preferencialmente abaixo de 20%.

6.1.1 Bio-secagem em túneis

As amostras de CDR que foram utilizadas nos ensaios de bio-secagem, foram principalmente provenientes do tratamento mecânico da CVO.

Aproveitando os 9 túneis de compostagem que tem disponíveis, ilustrados na Figura 6.1, e conforme referido no Capítulo 4, a amostra de CDR foi colocada em túnel.

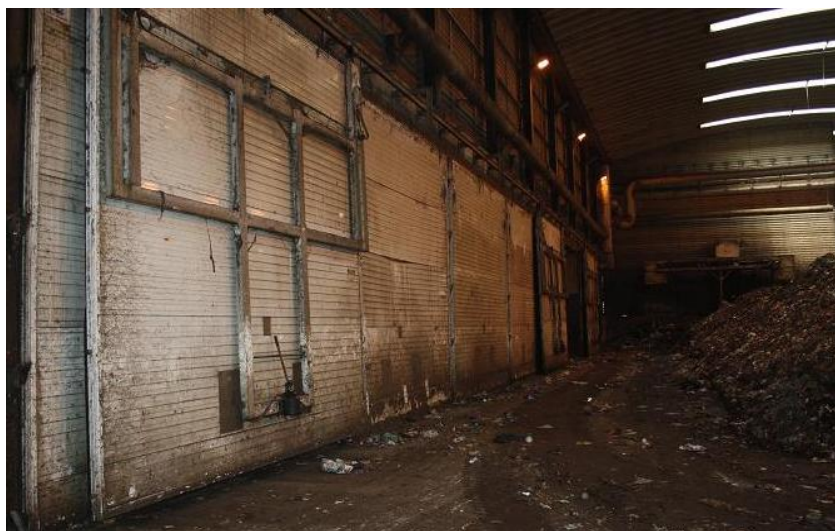


Figura 6.1: Túneis utilizados para a secagem biológica do CDR, localizados na VALNOR

O ensaio de bio-secagem em túnel teve um tempo de duração entre 14 a 29 dias, sujeito a diferentes condições de temperatura, efetuando-se a mudança para outro túnel duas ou três vezes, tendo sido testadas ambas as configurações.

Na Figura 6.2 pode observar-se um túnel que se encontra preparado para dar início a um novo ensaio.



Figura 6.2: Túnel de secagem biológica de CDR, localizado na VALNOR

Neste método, a mudança da amostra de CDR de um túnel para outro, durante o ensaio, corresponde ao processo equivalente do revolvimento. Desta forma não só se processa o arrefecimento da pilha, como também à destruição dos gradientes de temperatura e humidade, bem como dos caminhos preferenciais de circulação do ar, provocando a desagregação dos resíduos e tornando a massa homogénea (Martinho *et al.*, 2011). Assim permite-se que os resíduos que estavam em zonas da pilha mais frias sejam sujeitos a temperaturas mais elevadas e deste modo a humidade seja reduzida de forma gradual.

Findo o período do ensaio, procedeu-se à desgaseificação do túnel, antes de se retirar o CDR.

Na Figura 6.3 observa-se um túnel aberto, após a desgaseificação, preparado para ser despejado.



Figura 6.3: Túnel preparado para a secagem biológica do CDR, localizado na VALNOR

Após o processo de bio-secagem, o CDR é encaminhado para a unidade de preparação onde sofre uma trituração, reduzindo assim a sua granulometria.

Do produto que sai do pós-tratamento, são retirados recicláveis, uma fração de rejeitos, e o CDR propriamente dito.

O registo das informações sobre o ensaio, tais como a temperatura em diferentes pontos do túnel, o tempo decorrido do ensaio, o consumo energético, entre outros parâmetros, é efetuado em computador alocado a estes ensaios e que se encontra localizado no edifício onde se localizam os escritórios (ver Figura 6.4).



Figura 6.4: Computador que regista evolução do ensaio de secagem biológica em túnel

De seguida, apresentam-se os gráficos relativos aos 11 ensaios de bio-secagem em túnel que foram efetuados.

Nos ensaios de bio-secagem em túnel, o material utilizado foi principalmente proveniente do tratamento mecânico da CVO da VALNOR.

No final de todos os ensaios, o material do ensaio foi triturado na unidade CDR, tendo sido recolhidas 4 amostras.

O 1.º ensaio de bio-secagem em túnel, representado na Figura 6.5, decorreu de 28 de Fevereiro de 2014 a 14 de Março de 2014, tendo a duração de 14 dias. A temperatura a que decorreu o ensaio foi de 50 °C.

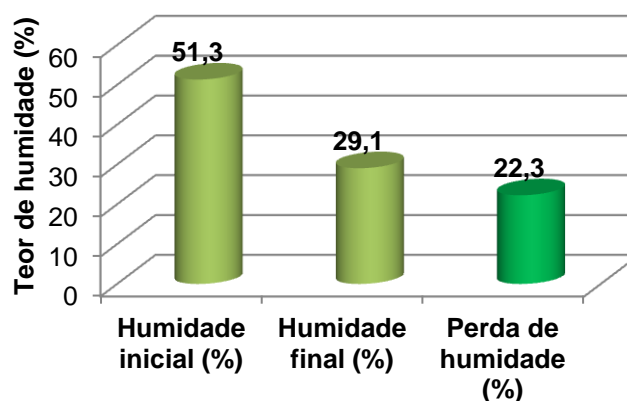


Figura 6.5: Teor de humidade no 1.º ensaio de bio-secagem em túnel

O 2.º ensaio de bio-secagem, representado na Figura 6.6, decorreu de 13 de Março de 2014 a 8 de Abril de 2014, tendo a duração de 26 dias. No dia 27 de Março de 2014, o material foi trocado de túnel, o que equivale a revoltar a pilha de CDR. Até dia 4 de Abril de 2014 a temperatura do túnel estava regulada para o 55 °C, e a dia 7 de Abril, foi reduzida para o 45 °C.

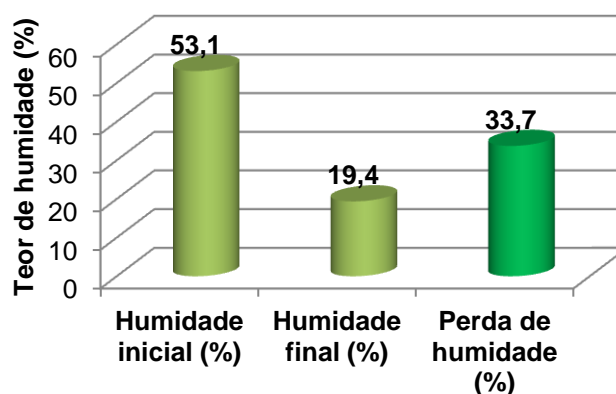


Figura 6.6: Teor de humidade no 2.º ensaio de bio-secagem em túnel

O ensaio n.º 3 de bio-secagem em túnel, representado na Figura 6.7, decorreu de 14 de Março de 2014 a 9 de Abril de 2014, tendo a duração de 26 dias. No dia 27 de Março de 2014, o material foi trocado de túnel, o que equivale a revoltar a pilha. Até dia 31 de Março de 2014 a temperatura no interior do túnel era de 55 °C, tendo sido reduzida para o 50 °C a dia 1 de Abril de 2014, e para 45 °C no dia 7 de Abril de 2014.

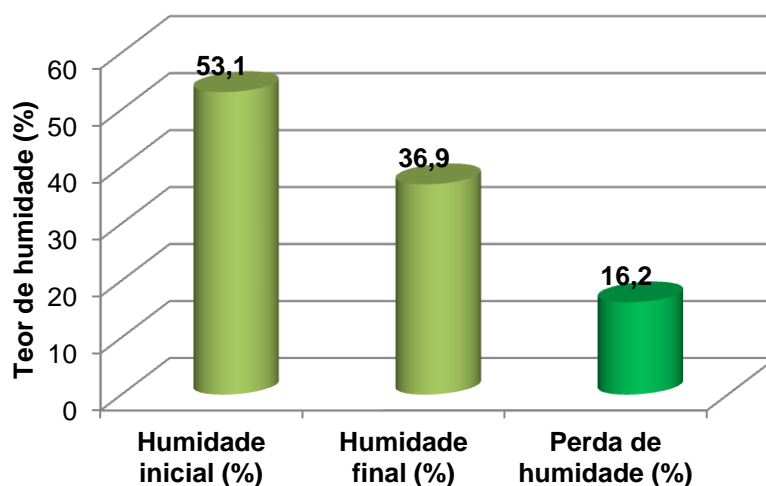


Figura 6.7: Teor de humidade no 3.º ensaio de bio-secagem em túnel

O ensaio n.º 4 de bio-secagem, representado na Figura 6.8, decorreu de 19 de Março de 2014 a 9 de Abril de 2014, tendo a duração de 21 dias. No dia 31 de Março de 2014, o material foi trocado de túnel, o que equivale a revoltar a pilha. Até dia 7 de Abril de 2014 a temperatura no interior do túnel estava regulada para os 50 °C, tendo posteriormente sido reduzida para os 45 °C.

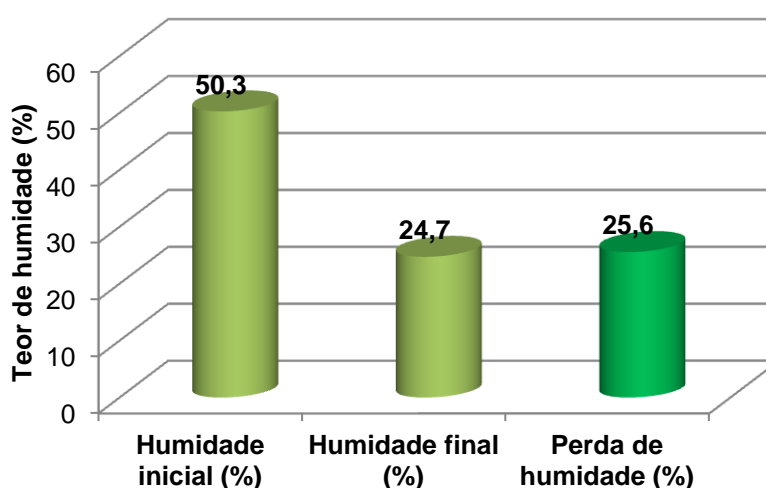


Figura 6.8: Teor de humidade no 4.º ensaio de bio-secagem em túnel

O 5.º ensaio de bio-secagem, representado na Figura 6.9, decorreu de 28 de Março de 2014 a 16 de Abril de 2014, tendo a duração de 19 dias. No dia 10 de Abril de 2014, o material foi trocado de túnel, o que equivale a revoltar a pilha. Até dia 8 de Abril de 2014 a temperatura foi regulada para os 50 °C, tendo sido reduzida para o 45 °C até dia 10 de Abril, quando ocorreu a troca de túnel, onde se aumentou a temperatura para 55 °C.

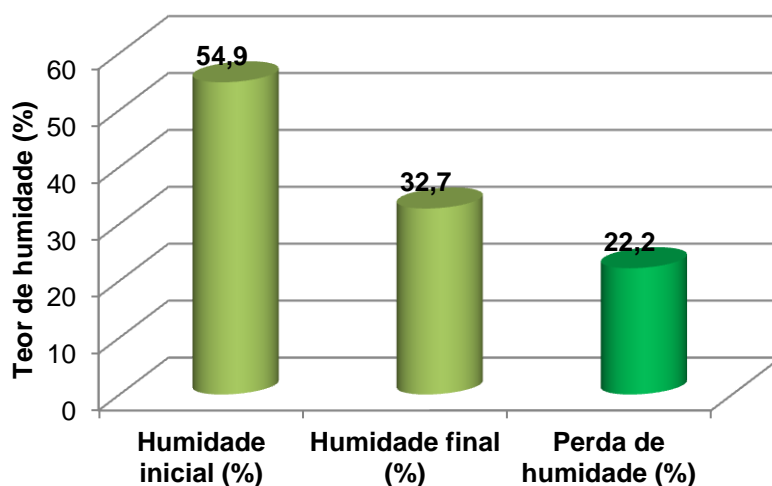


Figura 6.9: Teor de humidade no 5.º ensaio de bio-secagem em túnel

O 6.º ensaio, representado na Figura 6.10, decorreu de 9 de Abril de 2014 a 28 de Abril de 2014, tendo a duração de 19 dias. No dia 15 de Abril de 2014, o material foi trocado de túnel, o que equivale a revoltar a pilha. A temperatura a que decorreu o ensaio foi de 55 °C.

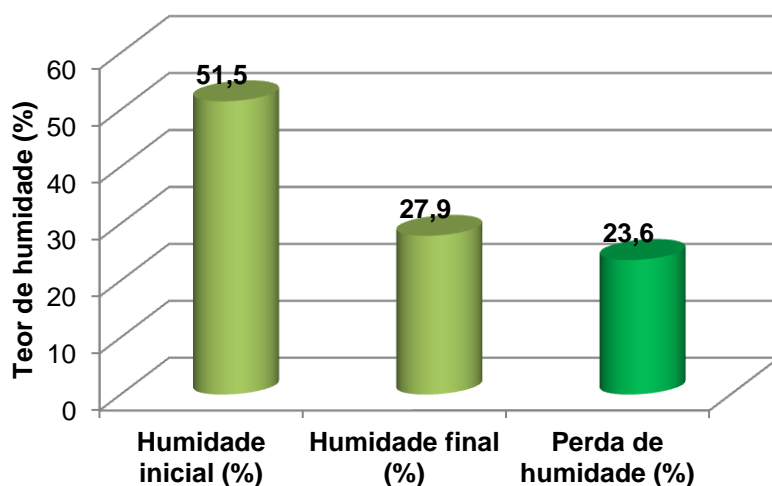


Figura 6.10: Teor de humidade no 6.º ensaio de bio-secagem em túnel

O ensaio n.º 7 de bio-secagem, representado na Figura 6.11, decorreu de 10 de Abril de 2014 a 28 de Abril de 2014, tendo a duração de 18 dias. No dia 16 de Abril de 2014, o material foi trocado de túnel, o que equivale a revoltear a pilha. O ensaio decorreu à temperatura de 60 °C.

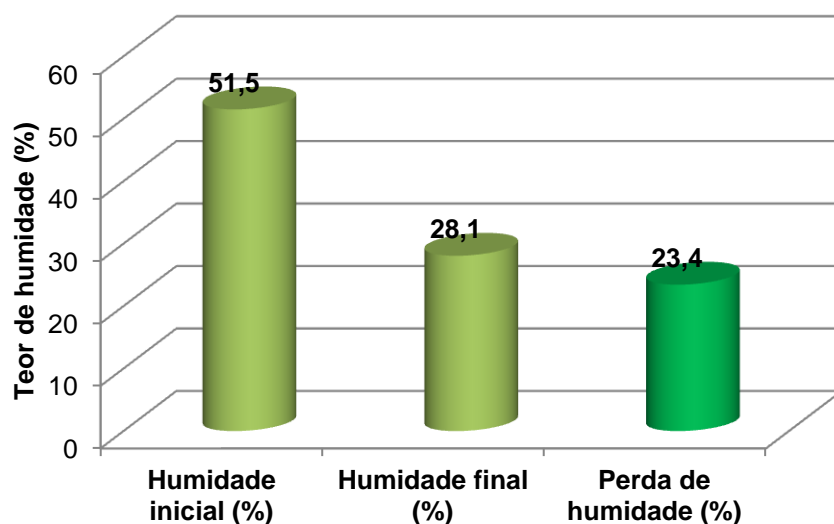


Figura 6.11: Teor de humidade no 7.º ensaio de bio-secagem em túnel

O ensaio n.º 8, representado na Figura 6.12, decorreu de 15 de Abril de 2014 a 29 de Abril de 2014, tendo a duração de 14 dias. No dia 22 de Abril de 2014, o material foi trocado de túnel, o que equivale a revoltear a pilha. A temperatura a que decorreu o ensaio foi de 55 °C.

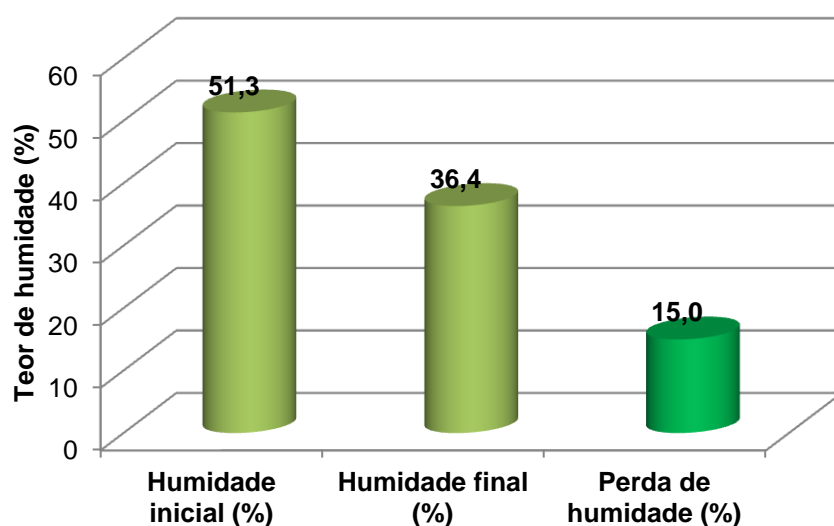


Figura 6.12: Teor de humidade no 8.º ensaio de bio-secagem em túnel

O 9.º ensaio de bio-secagem em túnel, representado na Figura 6.13, decorreu de 15 de Abril de 2014 a 29 de Abril de 2014, tendo a duração de 14 dias. A temperatura a que decorreu o ensaio foi de 60 °C.

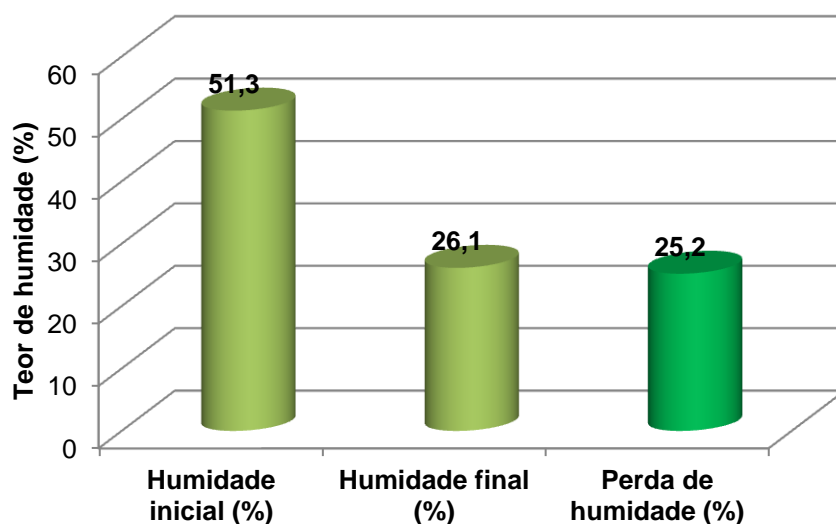


Figura 6.13: Teor de humidade no 9.º ensaio de bio-secagem em túnel

O 10.º ensaio de bio-secagem, representado na Figura 6.14, decorreu de 16 de Abril de 2014 a 15 de Maio de 2014, tendo a duração de 29 dias. Neste ensaio o material foi trocado duas vezes de túnel, ou seja, foram realizados dois revolveiros, o primeiro revolveiro a dia 30 de Abril de 2014, e o segundo revolveiro a dia 7 de Maio de 2014. Até dia 2 de Maio de 2014 a temperatura no interior do túnel era de 60 °C, onde após essa data, reduziu-se a temperatura para 55 °C até dia 5 de Maio de 2014. De 5 de Maio de 2014 até dia 9 de Maio de 2014 a temperatura foi regulada para o 50 °C, e até ao final do ensaio foi reduzida para os 40 °C.

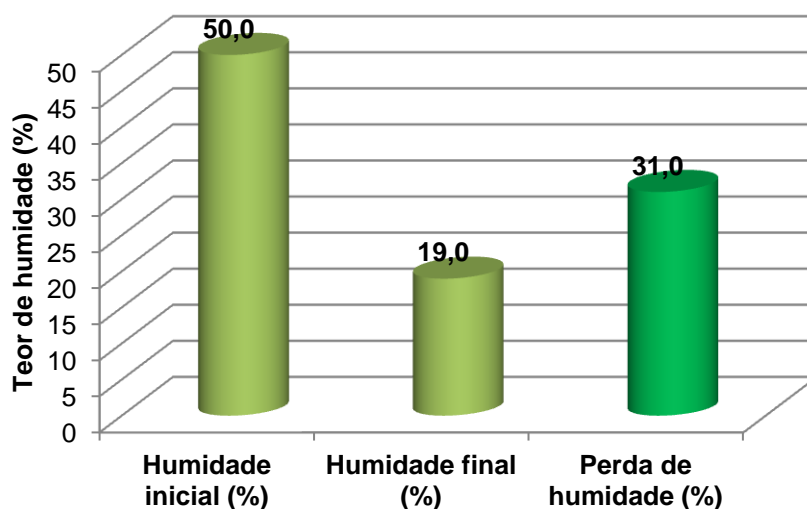


Figura 6.14: Teor de humidade no 10.º ensaio de bio-secagem em túnel

O ensaio n.º 11 e último ensaio de bio-secagem em túnel, representado na Figura 6.15, decorreu de 17 de Abril de 2014 a 15 de Maio de 2014, tendo a duração de 28 dias. Neste ensaio o material foi trocado duas vezes de túnel, ou seja, foram realizados dois revolveiros, o primeiro revolveiro a dia 30 de Abril de 2014, e o segundo revolveiro a dia 7 de Maio de 2014. Até dia 2 de Maio de 2014 a temperatura no interior do túnel era de 60 °C, tendo sido reduzida para 55 °C. No dia 9 de Maio de 2014 alterou-se a temperatura para os 50 °C, para os 45 °C no dia 12, e 40 °C no dia 13, até ao final do ensaio.

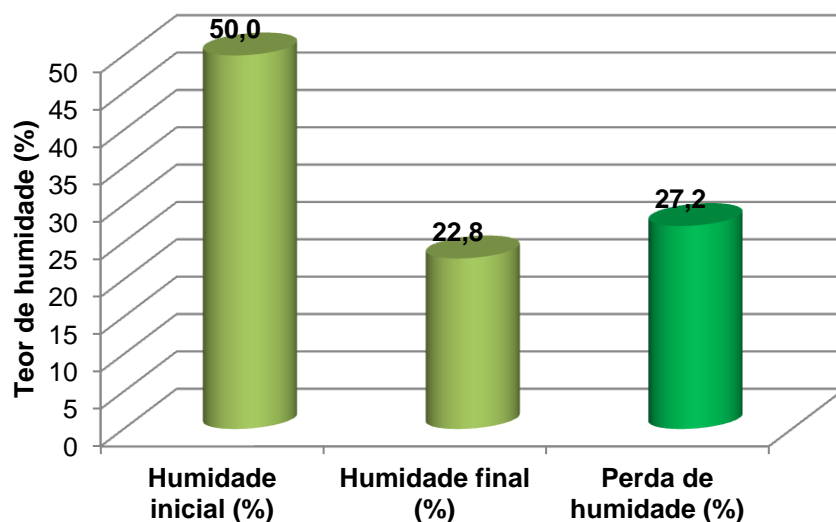


Figura 6.15: Teor de humidade no 11.º ensaio de bio-secagem em túnel

6.1.2 Bio-secagem em baia

Nos ensaios de bio-secagem em baia, foram utilizados os seguintes tipos de material:

- Amostra de CDR proveniente da VALNOR;
- Amostra de CDR, por triturar, proveniente da VALNOR.

Os ensaios de bio-secagem em baia decorreram com uma duração mínima de 12 dias, e máxima de 17 dias, sujeitos a diferentes condições de temperatura.

A Figura 6.16 ilustra a baia onde se realizaram os ensaios de bio-secagem.



Figura 6.16: Baia onde se realizaram os ensaios de bio-secagem de CDR (VALNOR, 2014a)

Utilizando os diferentes tipos de material já referidos, em cada um dos ensaios, o material foi colocado na baia, como se pode observar na Figura 6.17, recorrendo à ajuda de equipamentos mecânicos.



Figura 6.17: Baia contendo a amostra de CDR para o ensaio de bio-secagem de CDR (VALNOR, 2014a)

Na Figura 6.18 pode-se observar a colocação de tela, com a ajuda de operadores. Esta tela ou manta, trata-se de um geocompósito especial, que permite que o vapor de água seja libertado para o exterior, retendo os bio-aerossóis e reduzindo a emissão de odores. A tela é impermeável, ou seja, não permite a entrada de água.

Como esta pilha era relativamente pequena, não foi necessário o auxílio de equipamentos mecânicos na colocação da tela.



Figura 6.18: Colocação da tela sobre a amostra de CDR (VALNOR, 2014a)

A Figura 6.19 ilustra a pilha de CDR totalmente coberta pela tela, fixa nas laterais da baia, e com os pneus na parte a fazer peso, de modo a manter a tela presa, e não deixar entrar humidade.



Figura 6.19: Manta com a qual se cobre a pilha de CDR no decorrer do ensaio (VALNOR, 2014a)

O ventilador utilizado no ensaio de bio-secagem em baia, encontra-se representado na Figura 6.20.

A utilização de um ventilador tem como objetivos o fornecimento de oxigénio às bactérias, assim como controlar a temperatura da pilha, pois se esta atinge temperaturas muito elevadas (superiores a 70 °C, o que equivale a higienizar a pilha), as bactérias deixam de produzir calor suficiente para secar o CDR, o que não é de todo desejável no processo de bio-secagem.

O ventilador também é uma peça importante neste processo pois vai contribuir para a maximização do processo de evaporação, na medida em que "empurra o vapor de água para cima", de modo a que este passe a sair através dos microporos da tela.



Figura 6.20: Ventilador (VALNOR, 2014a)

Na Figura 6.21 podem-se observar os canais que estão ligados ao ventilador, e por onde sai o oxigênio que vai alimentar as bactérias bem como controlar a temperatura da pilha de CDR.



Figura 6.21: Canais do O₂ da pilha (VALNOR, 2014a)

Durante o tempo de duração do ensaio de bio-secagem, ocorre a monitorização da pilha de CDR, através de duas sondas, como se pode ver na Figura 6.22.

Uma das sondas mediu o oxigênio, e a outra sonda mediu a temperatura.



Figura 6.22: Sondas de medição de O_2 e de temperatura da pilha (VALNOR, 2014a)

As sondas foram posteriormente colocadas sensivelmente a meio, no topo da pilha, tendo a tela uma furação indicada para a colocação das sondas, conforme a imagem apresentada na Figura 6.23.



Figura 6.23: Sondas de medição de O_2 e temperatura já colocadas na tela, em contacto com a pilha (VALNOR, 2014a)

No hangar anexo à baía, localiza-se o equipamento que regista o tempo de duração do ensaio, as condições de temperatura e oxigénio, representado na Figura 6.24.



Figura 6.24: Equipamento de controlo da pilha de CDR

Na Figura 6.25 apresenta-se um fluxograma do processo existente na preparação de CDR para o ensaio de bio-secagem em baia.

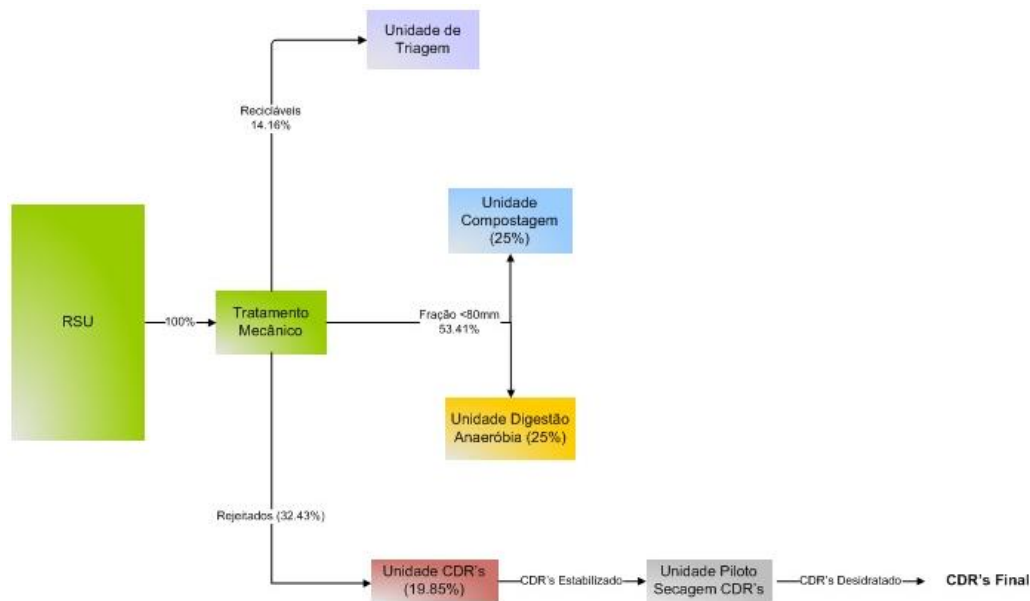


Figura 6.25: Fluxograma do processo existente na preparação de CDR para o ensaio de bio-secagem em baia (VALNOR, 2014a)

Em seguida, apresentam-se os gráficos relativos aos 10 ensaios de bio-secagem em baia que se realizaram.

No ensaio n.º 1 de bio-secagem em baia, representado na Figura 6.26, o material utilizado foi principalmente proveniente do tratamento mecânico da CVO da VALNOR. O ensaio decorreu de 9 de Maio de 2013 a 21 de Maio de 2013, tendo a duração de 12 dias. A pilha de CDR atingiu uma temperatura máxima de 50 °C.

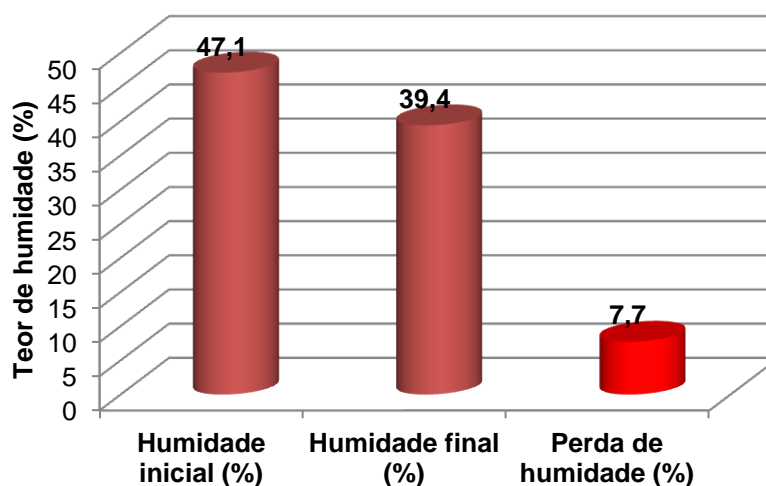


Figura 6.26: Teor de humidade no 1.º ensaio de bio-secagem em baia

No ensaio n.º 2 de bio-secagem, representado na Figura 6.27, o material utilizado proveio principalmente do tratamento mecânico da CVO da VALNOR. O ensaio decorreu de 22 de Maio de 2013 a 5 de Junho de 2013, tendo a duração de 14 dias. A pilha de CDR atingiu uma temperatura máxima de 60 °C.

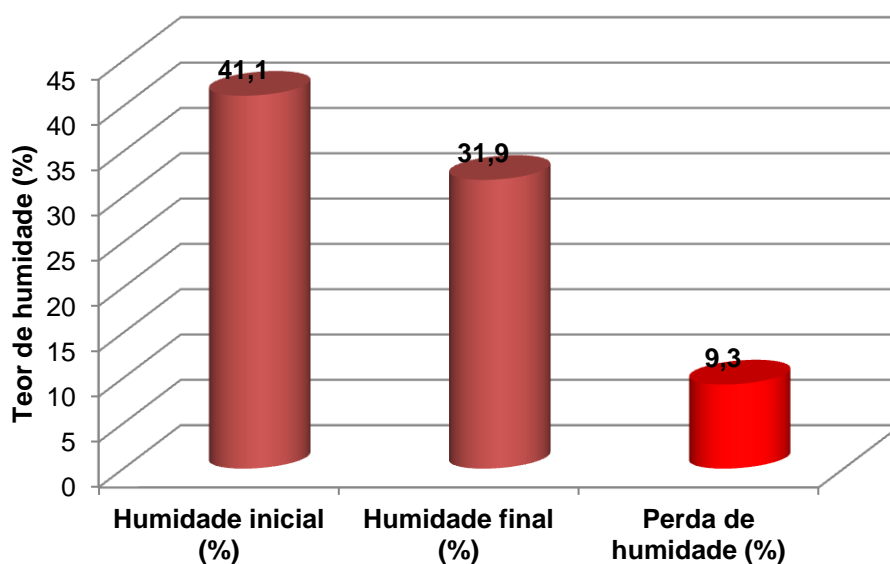


Figura 6.27: Teor de humidade no 2.º ensaio de bio-secagem em baia

No 3.º ensaio de bio-secagem em baia, representado na Figura 6.28, o material utilizado foi principalmente proveniente do tratamento mecânico da CVO da VALNOR. O ensaio decorreu de 6 de Junho de 2013 a 20 de Junho de 2013, tendo a duração de 14 dias. A pilha de CDR atingiu uma temperatura máxima de 55 °C.

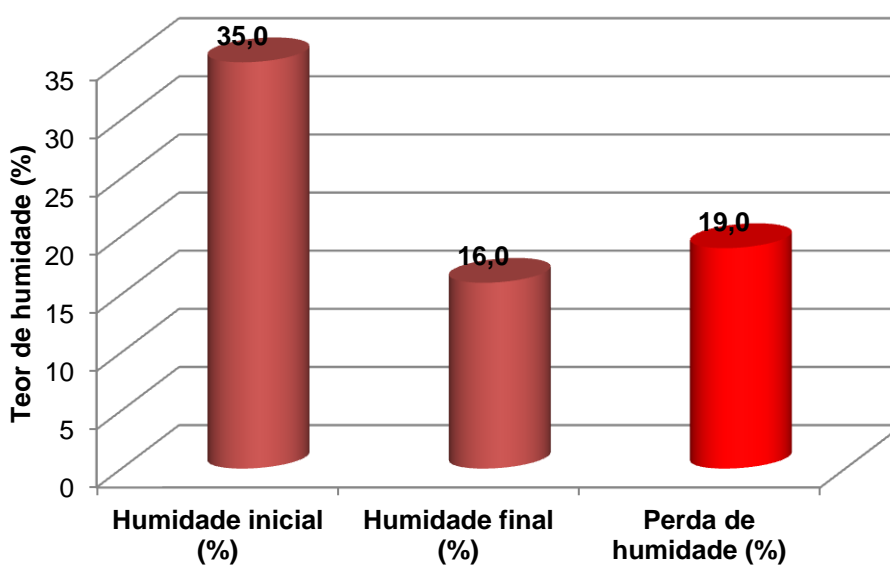


Figura 6.28: Teor de humidade no 3.º ensaio de bio-secagem em baia

No 4.º ensaio de bio-secagem, representado na Figura 6.29, o material utilizado foi principalmente proveniente do tratamento mecânico da CVO da VALNOR. O ensaio decorreu de 20 de Junho de 2013 a 3 de Julho de 2013, tendo a duração de 13 dias. A pilha de CDR atingiu uma temperatura máxima de 60 °C.

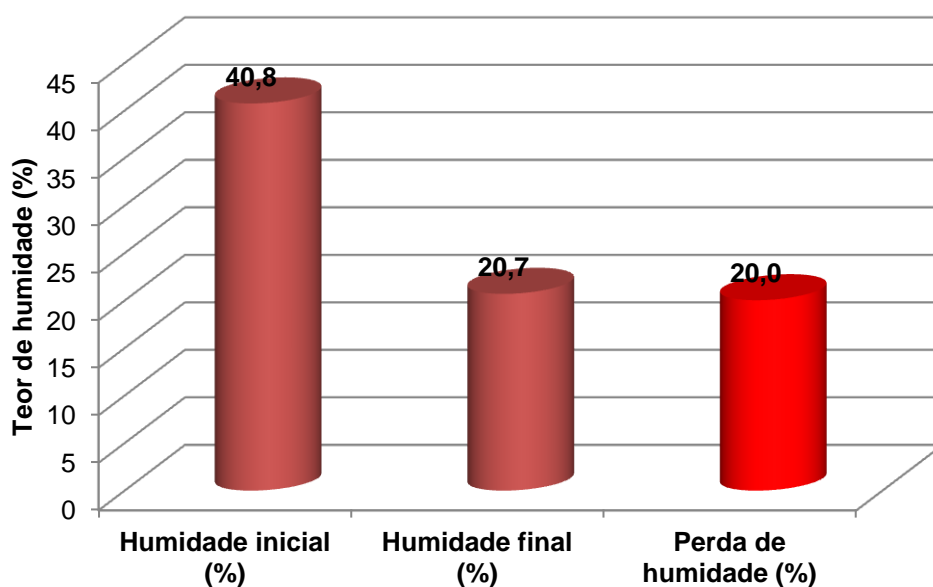


Figura 6.29: Teor de humidade no 4.º ensaio de bio-secagem em baia

No ensaio n.º 5 de bio-secagem, representado na Figura 6.30, o material utilizado foi CDR proveniente da AMARSUL. O ensaio decorreu de 3 de Julho de 2013 a 17 de Julho de 2013, tendo a duração de 14 dias. A pilha de CDR atingiu uma temperatura máxima de 60 °C.

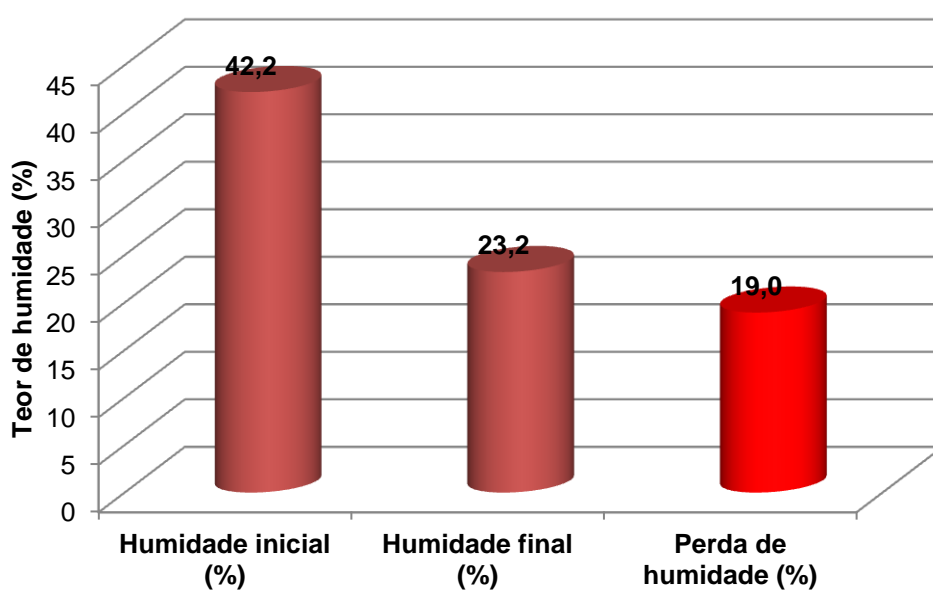


Figura 6.30: Teor de humidade no 5.º ensaio de bio-secagem em baia

No ensaio n.º 6 de bio-secagem, representado na Figura 6.31, o material utilizado foi CDR proveniente da AMARSUL. O ensaio decorreu de 18 de Julho de 2013 a 1 de Agosto de 2013, tendo a duração de 14 dias. A pilha de CDR atingiu uma temperatura máxima de 60 °C.

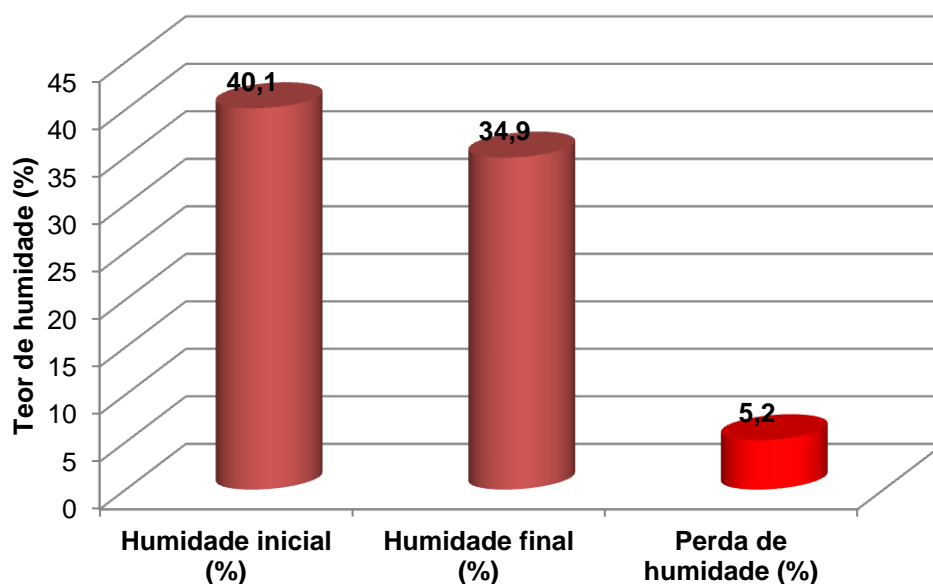


Figura 6.31: Teor de humidade no 6.º ensaio de bio-secagem em baia

No 7.º ensaio de bio-secagem em baia, representado na Figura 6.32, o material utilizado foi principalmente proveniente do tratamento mecânico da CVO da VALNOR. O ensaio decorreu de 5 de Setembro de 2013 a 19 de Setembro de 2013, tendo a duração de 14 dias. A pilha de CDR atingiu uma temperatura máxima de 55 °C.

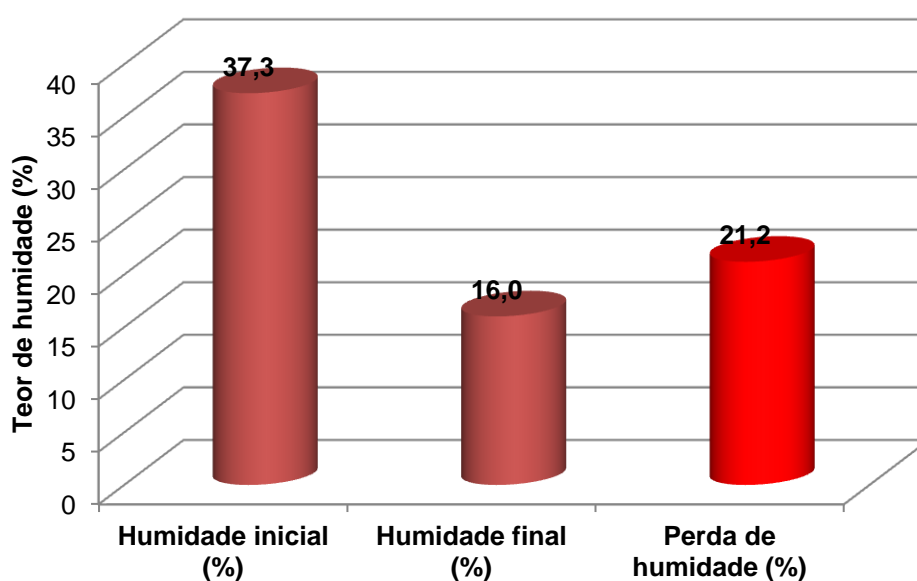


Figura 6.32: Teor de humidade no 7.º ensaio de bio-secagem em baia

No 8.º ensaio de bio-secagem, representado na Figura 6.33, o material utilizado foi principalmente proveniente do tratamento mecânico da CVO da VALNOR. O ensaio decorreu de 25 de Setembro de 2013 a 7 de Outubro de 2013, tendo a duração de 12 dias. A pilha de CDR atingiu uma temperatura máxima de 55 °C.

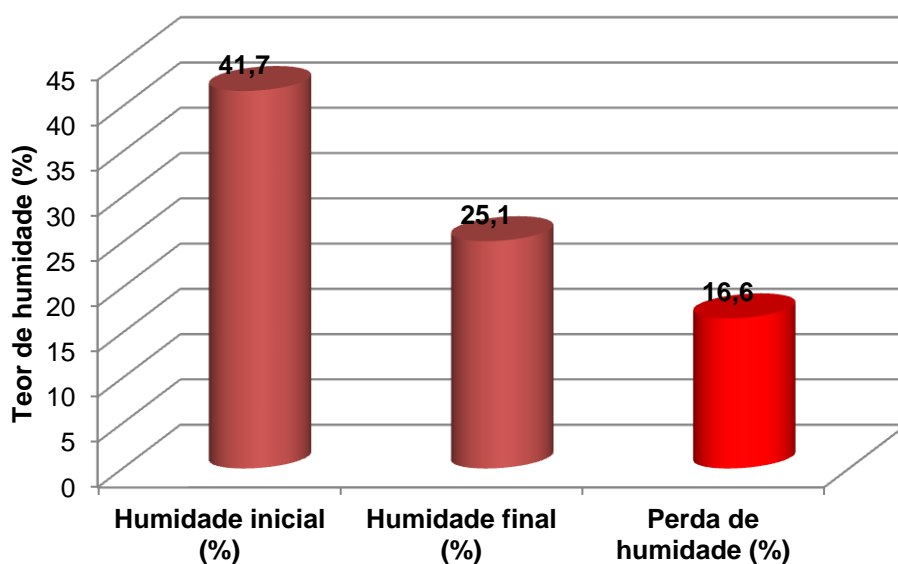


Figura 6.33: Teor de humidade no 8.º ensaio de bio-secagem em baia

No ensaio n.º 9 de bio-secagem em baia, representado na Figura 6.34, o material utilizado foi principalmente proveniente do tratamento mecânico da CVO da VALNOR. O ensaio decorreu de 11 de Outubro de 2013 a 24 de Outubro de 2013, tendo a duração de 13 dias. A pilha de CDR atingiu uma temperatura máxima de 55 °C.

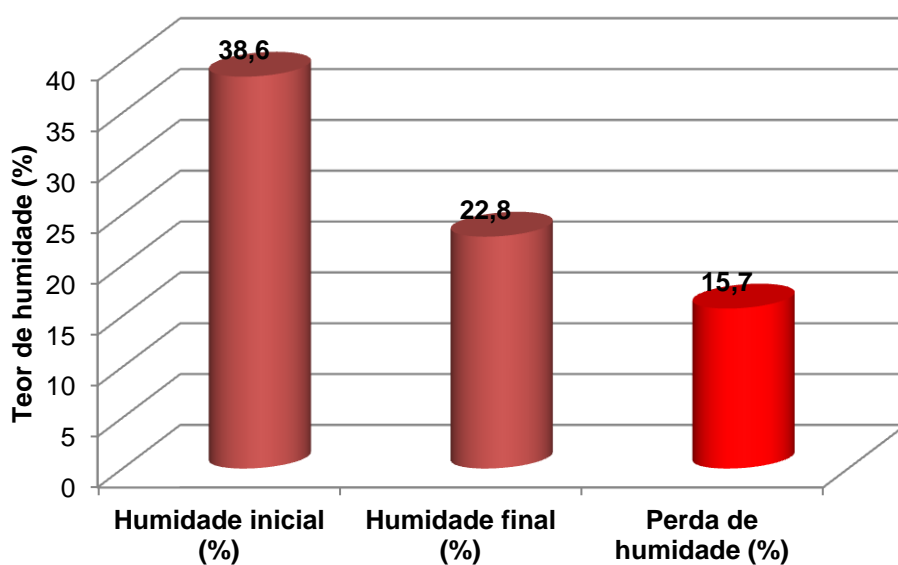


Figura 6.34: Teor de humidade no 9.º ensaio de bio-secagem em baia

No 10.º, e último ensaio de bio-secagem em baia, representado na Figura 6.35, o material utilizado foi principalmente proveniente do tratamento mecânico da CVO da VALNOR. O ensaio decorreu de 20 de Dezembro de 2013 a 6 de Janeiro de 2014, tendo a duração de 17 dias. A pilha de CDR atingiu uma temperatura máxima de 60 °C.

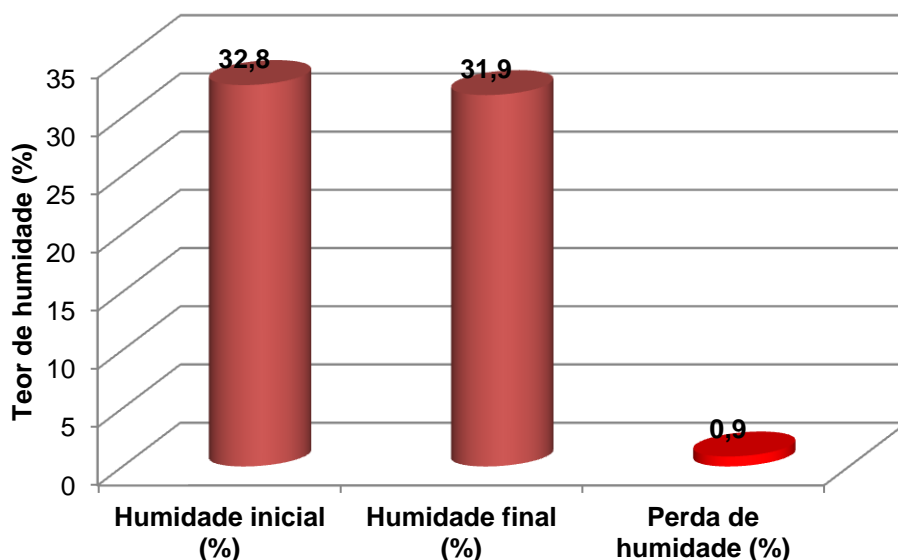


Figura 6.35: Teor de humidade no 10.º ensaio de bio-secagem em baia

6.2 Ensaio de bio-secagem com telas

O ensaio realizado nas instalações da VALNOR, com recurso à utilização de telas da empresa alemã CONVAERO, consistiu em 12 ensaio de bio-secagem.

Nos ensaios, foram utilizadas diferentes amostras, tais como:

- CDR com uma granulometria inferior a 200 mm;
- CDR com uma granulometria inferior a 30 mm;
- RU triturado;
- CDR com uma granulometria inferior a 200 mm, juntamente com finos orgânicos.

O ensaio de bio-secagem com tela, difere do ensaio de bio-secagem em baia, pois a baia possui uma construção em cimento, em 3 dos 4 lados, e as suas dimensões são bastante reduzidas, comparativamente com as dimensões da pilha do ensaio com tela.

Como se pode observar na Figura 6.36, a pilha estava cheia com CDR, onde cada ensaio, era constituído por diferentes amostras, tal como supra citado.

Antes da colocação do CDR em pilha, colocou-se primeiro todo o equipamento associado ao ventilador, de modo a este poder arejar a pilha de CDR.

Posteriormente, procedeu-se à colocação da respetiva amostra de CDR em pilha, conforme a Figura 6.36.



Figura 6.36: Pilha de CDR preparado para receber a cobertura com tela, elaborado pela CONVAERO, nas instalações da VALNOR

Esta pilha de CDR, foi posteriormente coberta por uma tela, com a ajuda de equipamentos mecânicos. Com o auxílio de duas escavadoras, estas, com o balde, ergueram uma das extremidades da tela, cobrindo a totalidade da pilha, em todo o seu comprimento.



Figura 6.37: Pilha de CDR semi coberta com a tela

Como se pode observar na Figura 6.38, após a total cobertura da pilha de CDR com a tela, procedeu-se à colocação de pneus, e fardos, com a finalidade de fazer peso, para que a tela se mantivesse no sítio, impedindo a entrada de humidade.

Esta tela ou manta, corresponde a um geocompósito especial, que permite que o vapor de água seja libertado para o exterior, retendo os bio-aerossóis e reduzindo a emissão de odores. A tela é impermeável, ou seja, não permite a entrada de água.

Após o processo de secagem, os resíduos podem sofrer uma trituração, de modo a reduzir a sua granulometria para as condições exigidas pela cimenteira. Do produto resultante do pós-tratamento, são retirados recicláveis, uma fração de rejeitos, e o CDR propriamente dito.



Figura 6.38: Pilha de CDR totalmente coberta com tela

Tal como referido anteriormente a utilização do ventilador, representado na Figura 6.39, tem como objetivo o fornecimento de oxigénio às bactérias, assim como controlar a temperatura da pilha, uma vez que se pretende evitar temperaturas muito elevadas (superiores a 70 °C, equivale a higienizar a pilha), pois as bactérias deixam de gerar o calor pretendido para a redução da humidade do CDR, situação que não é desejável no processo de bio-secagem.

O ventilador contribui assim para a maximização do processo de evaporação, "empurrando o vapor de água para cima", para que saia através dos microporos da tela.



Figura 6.39: Pormenor do ventilador utilizado na secagem biológica do CDR

Este processo de secagem biológica decorre entre 10 a 20 dias, dependendo das condições das instalações, e das condições climáticas, sendo que as pilhas são revolteadas 1 a 4 vezes.

O processo de revolvimento, não só arrefece a pilha, como também destrói os gradientes da temperatura e humidade, caminhos preferenciais de circulação do ar, permite que resíduos que estavam em zonas da pilha mais frias sejam sujeitos a temperaturas mais elevadas, provoca a desagregação dos resíduos e torna a massa homogénea (Martinho *et al.*, 2011).

No processo de secagem todos os parâmetros são registados no computador alocado para este trabalho, Figura 6.40, e cujo programa agrega as diferentes temperaturas e o tempo de duração do processo, entre outras informações.



Figura 6.40: Cabine onde se encontra o computador que regista os dados, junto à pilha de CDR localizada na VALNOR

De seguida, apresentam-se os gráficos relativos aos 12 ensaios de bio-secagem com tela.

O ensaio n.º 1, representado na Figura 6.41, teve como amostra inicial CDR com granulometria inferior a 200 μ m. Decorreu de 3 de Dezembro de 2013 a 14 de Dezembro de 2013, tendo uma duração de 10 dias, e sido 2 vezes revolteado.

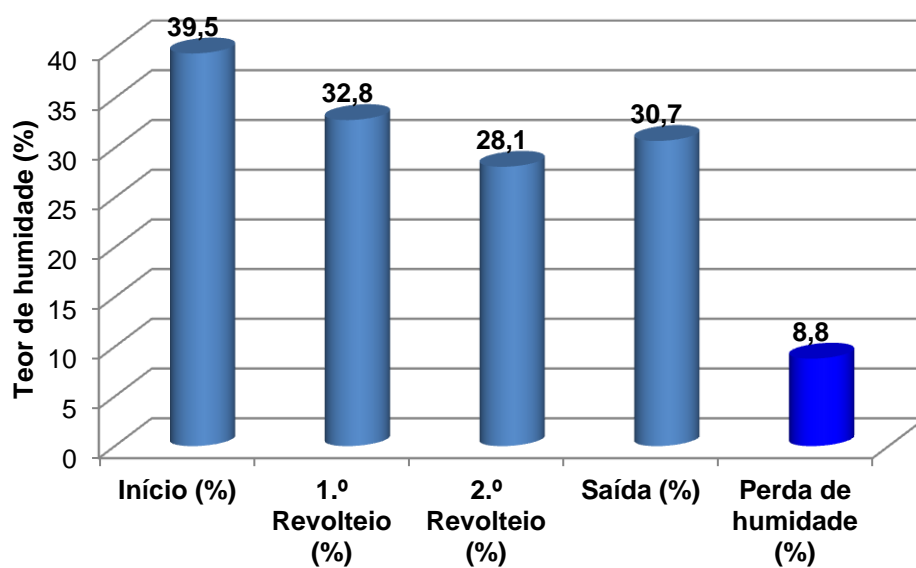


Figura 6.41: Teor de humidade no 1.º ensaio de bio-secagem com tela

O ensaio n.º 2, representado na Figura 6.42, teve como amostra inicial CDR com granulometria inferior a 200 mm. Decorreu de 3 de Dezembro de 2013 a 18 de Dezembro de 2013, tendo uma duração de 14 dias, e sido 1 vez revolteado.

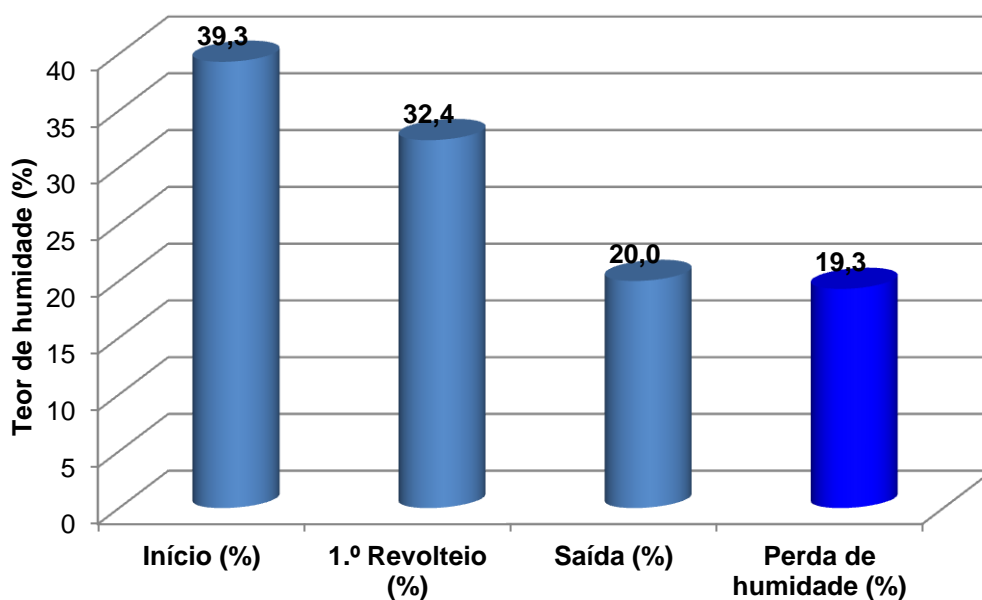


Figura 6.42: Teor de humidade no 2.º ensaio de bio-secagem com tela

O ensaio n.º 3, representado na Figura 6.43, teve como amostra inicial CDR com granulometria inferior a 30 mm. Decorreu de 3 de Janeiro de 2014 a 14 de Janeiro de 2014, tendo uma duração de 10 dias, e sido 2 vezes revolteado.

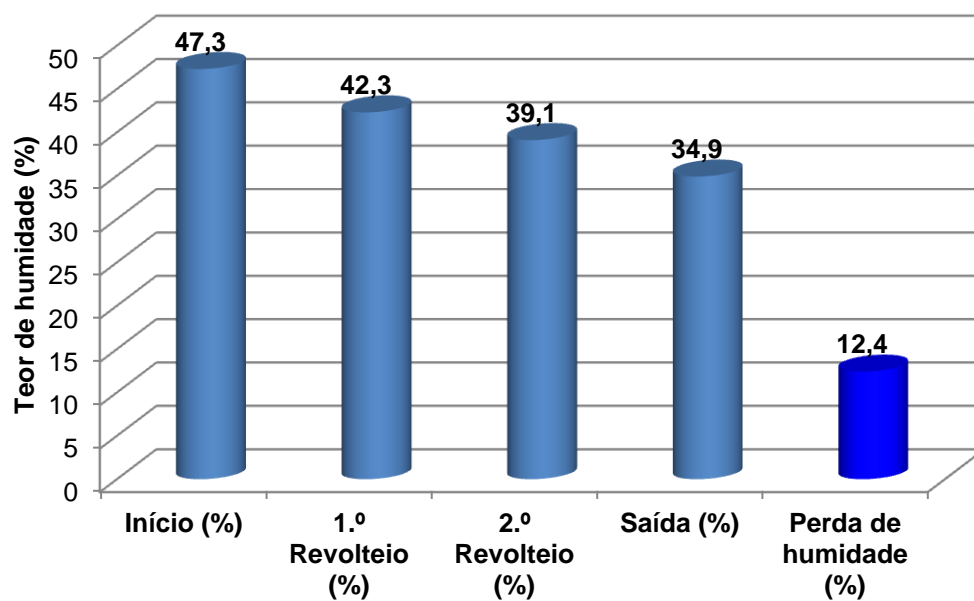


Figura 6.43: Teor de humidade no 3.º ensaio de bio-secagem com tela

O ensaio n.º 4, representado na Figura 6.44, teve como amostra inicial CDR com granulometria inferior a 30 mm. Decorreu de 3 de Janeiro de 2014 a 18 de Dezembro de 2013, tendo uma duração de 14 dias, e sido 1 vez revolteado.

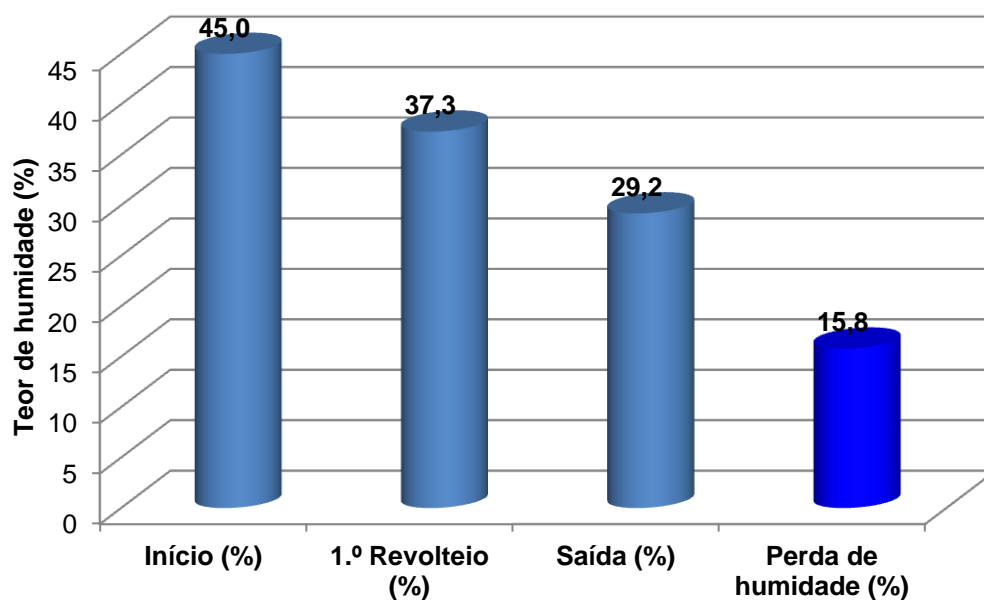


Figura 6.44: Teor de humidade no 4.º ensaio de bio-secagem com tela

O ensaio n.º 5, representado na Figura 6.45, teve como amostra inicial fração resto de RU triturado. Decorreu de 18 de Janeiro de 2014 a 7 de Fevereiro de 2014, tendo uma duração de 19 dias, e sido 4 vezes revolteado.

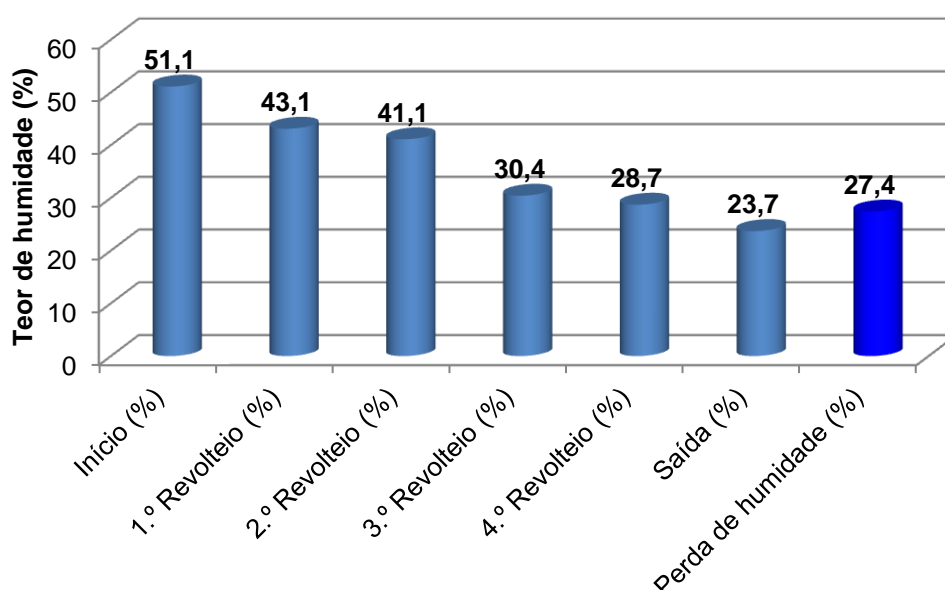


Figura 6.45: Teor de humidade no 5.º ensaio de bio-secagem com tela

O ensaio n.º 6, representado na Figura 6.46, teve como amostra inicial fração resto de RU triturado. Decorreu de 17 de Janeiro de 2014 a 7 de Fevereiro de 2014, tendo uma duração de 20 dias, e sido 2 vezes revolteado.

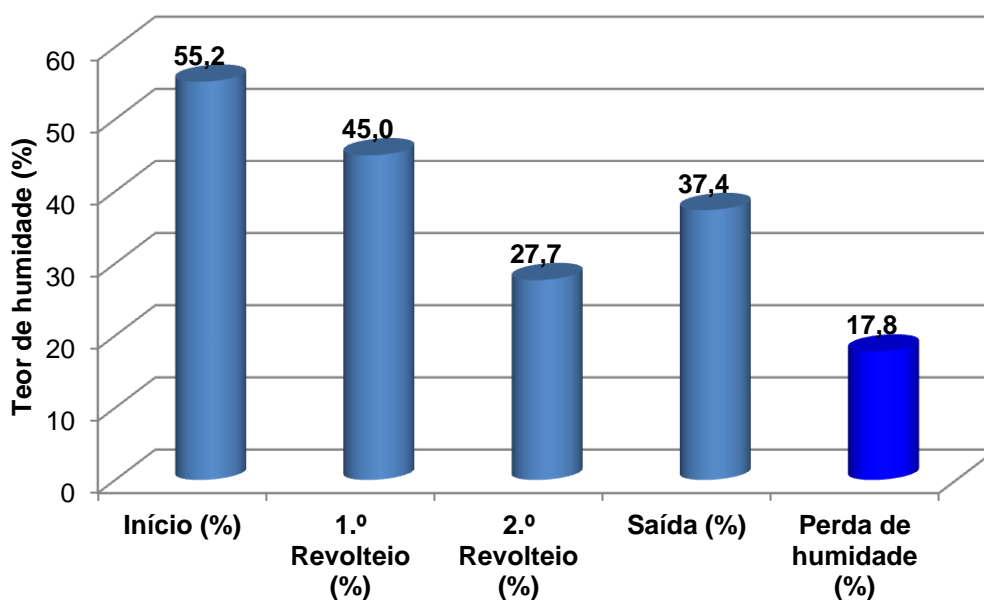


Figura 6.46: Teor de humidade no 6.º ensaio de bio-secagem com tela

O ensaio n.º 7, representado na Figura 6.47, teve como amostra inicial CDR com granulometria inferior a 200 mm. Decorreu de 10 de Fevereiro de 2014 a 12 de Março de 2014, tendo uma duração de 29 dias, e sido 4 vezes revolteado.

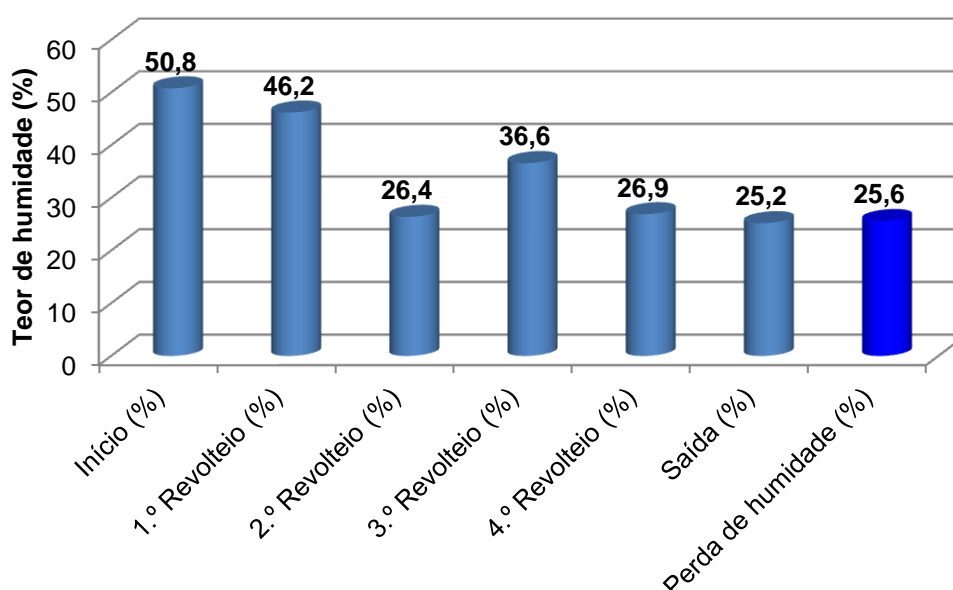


Figura 6.47: Teor de humidade no 7.º ensaio de bio-secagem com tela

O ensaio n.º 8, representado na Figura 6.48, teve como amostra inicial CDR com granulometria inferior a 30 mm. Decorreu de 10 de Fevereiro de 2014 a 5 de Março de 2014, tendo uma duração de 22 dias, e sido 3 vezes revolteado.

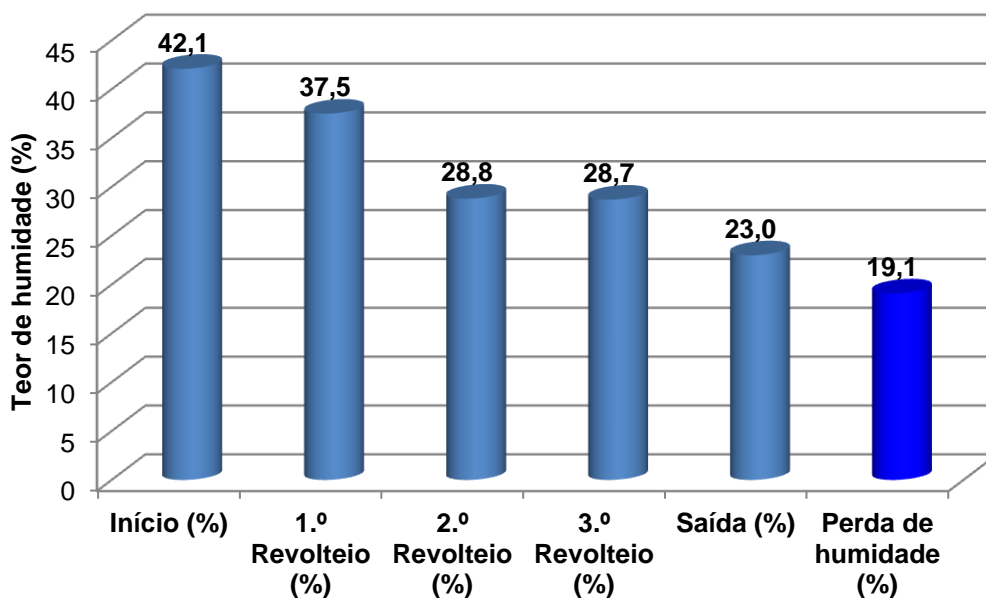


Figura 6.48: Teor de humidade no 8.º ensaio de bio-secagem com tela

O ensaio n.º 9, representado na Figura 6.49, teve como amostra inicial fração resto de RU triturado. Decorreu de 13 de Março de 2014 a 9 de Abril de 2014, tendo uma duração de 26 dias, e sido 3 vezes revolteado.

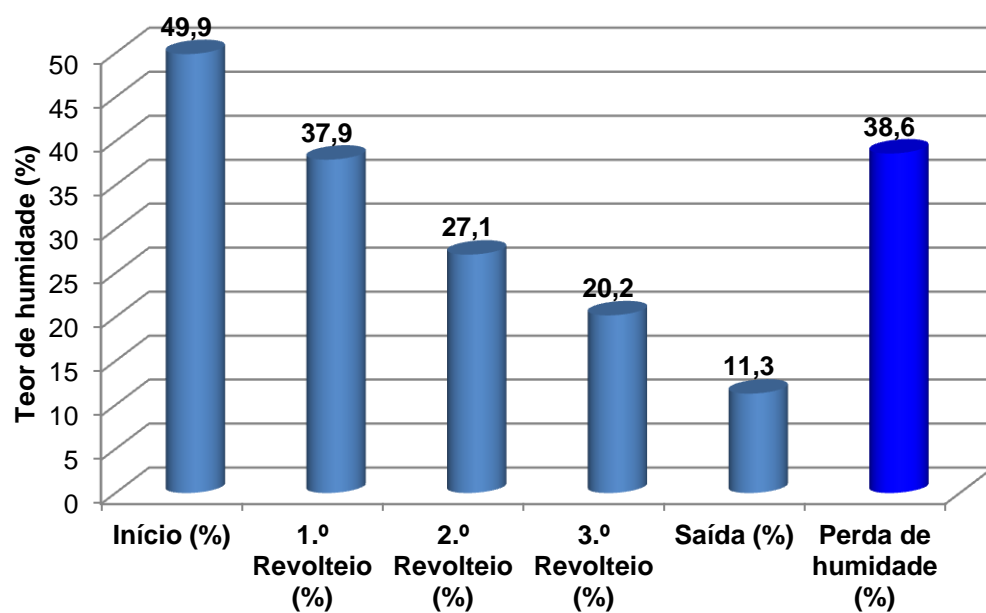


Figura 6.49: Teor de humidade no 9.º ensaio de bio-secagem com tela

O ensaio n.º 10, representado na Figura 6.50, teve como amostra inicial fração resto de RU triturado. Decorreu de 13 de Março de 2014 a 9 de Abril de 2014, tendo uma duração de 26 dias, e sido 3 vezes revolteado.

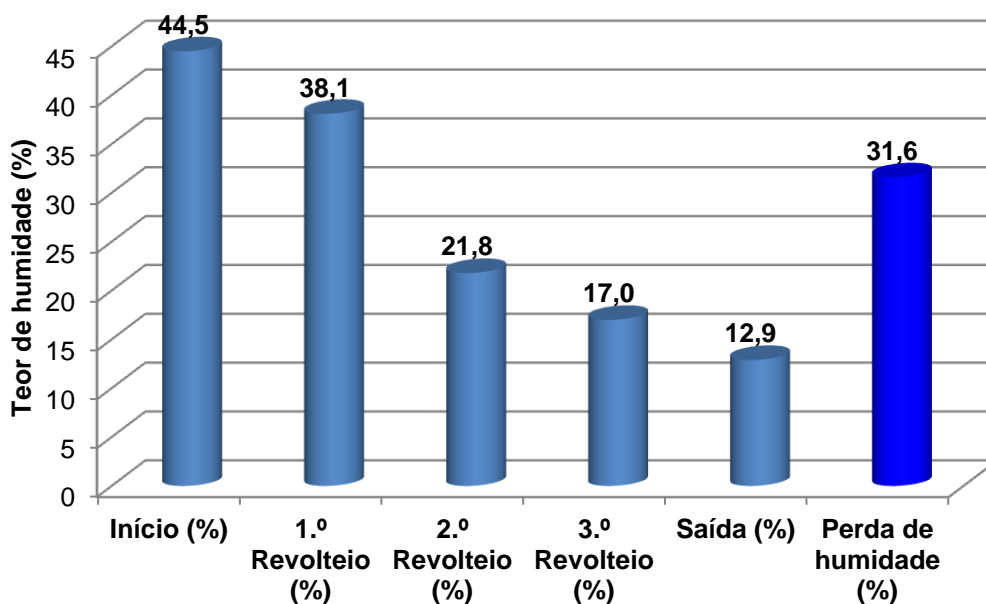


Figura 6.50: Teor de humidade no 10.º ensaio de bio-secagem com tela

O ensaio n.º 11, representado na Figura 6.51, teve como amostra inicial CDR com granulometria inferior a 200 μ m, juntamente com uma fração de finos. Decorreu de 16 de Abril de 2014 a 14 de Maio de 2014, tendo uma duração de 27 dias, e sido 4 vezes revolteado.

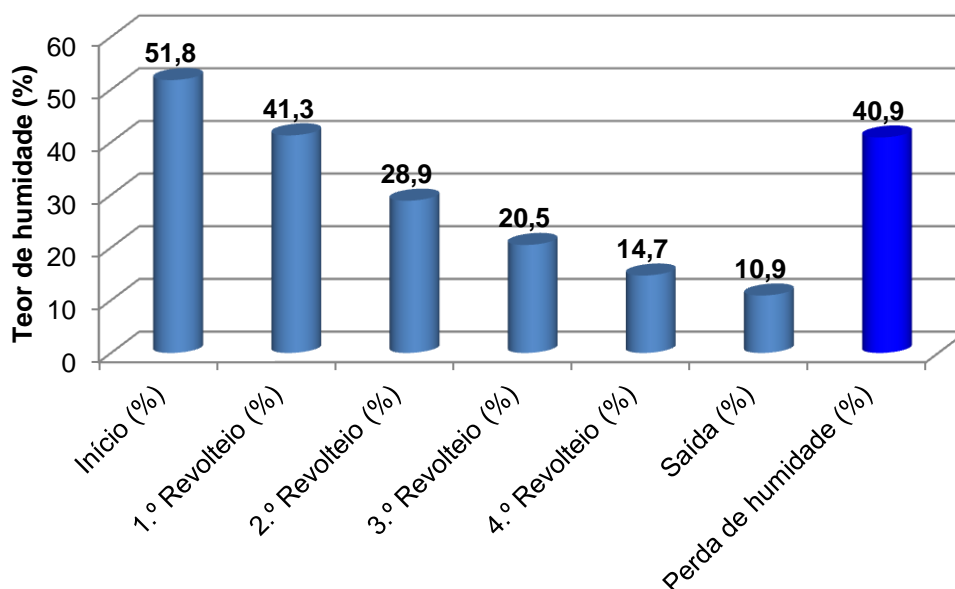


Figura 6.51: Teor de humidade no 11.º ensaio de bio-secagem com tela

O ensaio n.º 12, representado na Figura 6.52, teve como amostra inicial CDR com granulometria inferior a 200 mm. Decorreu de 16 de Abril de 2014 a 9 de Maio de 2014, tendo uma duração de 22 dias, e sido 3 vezes revolteado.

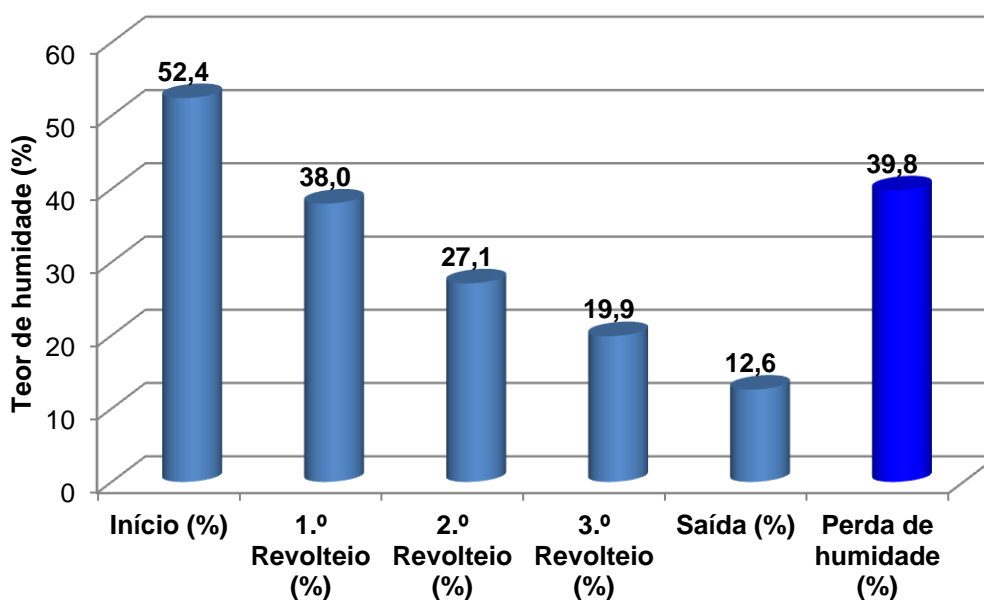


Figura 6.52: Teor de humidade no 12.º ensaio de bio-secagem com tela

6.3 Emissões

O maior benefício associado à utilização dos resíduos como fonte de energia é a redução da emissão dos poluentes gasosos que causam efeitos à escala local e global (IEA, 2003).

Com base na abordagem de análise de ciclo de vida dos vários tipos de energia renovável, na recuperação convencional de energia dos resíduos (incineração dedicada de RU) as emissões totais de CO₂ são de 1.100 kg/t RU e 1.833 g/kWh, considerando um RU com um PCI médio de 10 MJ/kg (IEA, 2003).

No caso de deposição em aterro, uma tonelada de RU é responsável pela emissão de cerca de 70 kg de metano, o que equivale à emissão de 1.610 kg CO₂/t RU (IEA, 2003).

Conclui-se que a recuperação de energia dos resíduos conduz a uma redução efetiva das emissões de gases com efeito de estufa (IEA, 2003).

No caso da utilização de CDR considera-se que as emissões evitadas de aterro são menores dado que menor conteúdo orgânico é tido em conta. Complementarmente, graças a uma maior eficácia na separação dos vários fluxos de resíduos, existe um aumento na quantidade de resíduos capazes de serem reciclados pelo que maiores quantidades de CO₂ são evitadas pela utilização de

CDR face a RU. Foram identificados ainda outros ganhos decorrentes da recuperação de energia a partir de resíduos, de que se destacam (IEA, 2003):

- Redução da emissão de GEE;
- Redução da emissão de gases ácidos;
- Redução da depleção de recursos naturais (materiais e combustíveis fósseis);
- Redução do impacto na água (lixiviados);
- Redução da contaminação de solos.

6.4 Discussão de Resultados

6.4.1 Resultados dos ensaios de bio-secagem

Em seguida, apresentam-se os resultados relativos aos ensaios de bio-secagem realizados na VALNOR.

Na Figura 6.53, apresenta-se as perdas de humidade, em percentagem, dos ensaios de bio-secagem em túnel, baia e com telas.

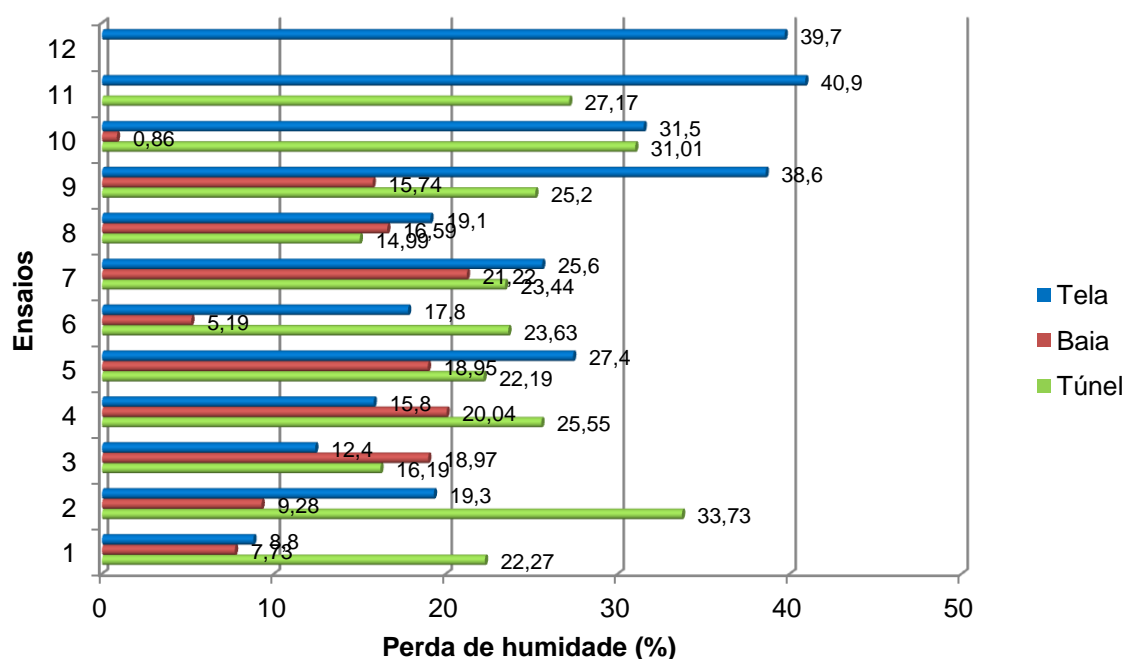


Figura 6.53: Perdas de humidade em cada um dos ensaios de bio-secagem

6.4.2 PCI do ensaio de bio-secagem com telas

Na Figura 6.54, apresentam-se os valores de poder calorífico inferior, para cada um dos 12 ensaios realizados.

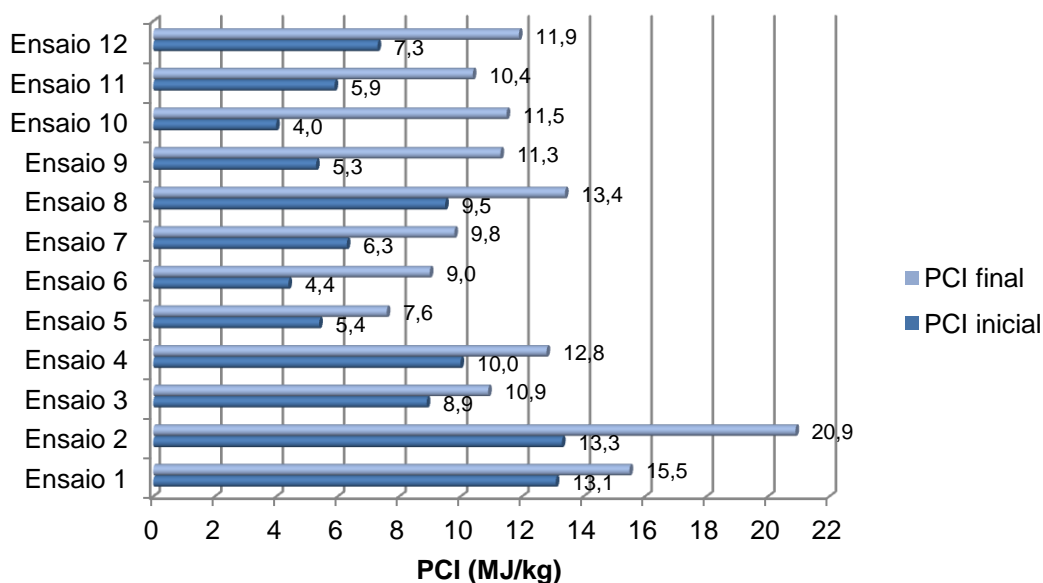


Figura 6.54: PCI do ensaio de bio-secagem com telas

No ensaio de bio-secagem em túnel, dos 11 ensaios realizados, 2 ensaios apresentaram um teor médio de humidade igual ou inferior a 20%. Verifica-se que para se conseguir um teor de humidade abaixo dos 20%, foram necessários respetivamente, 26 e 29 dias de ensaio. Observa-se ainda que a pilha com uma temperatura entre os 55 e 60 °C conduz a uma maior redução no teor de humidade, assim como revoltar 2 vezes a pilha, o que no caso, equivaleu a trocar o material 2 vezes de túnel.

No ensaio de bio-secagem em baia, dos 10 ensaios realizados, em 2 ensaios obteve-se um teor médio de humidade igual ou inferior a 20%, que correspondem a um tempo de ensaio de 14 dias, e a uma temperatura máxima de 55 °C.

No ensaio de bio-secagem com tela, dos 12 ensaios realizados, 5 ensaios apresentaram um teor médio de humidade igual ou inferior a 20%. Dos mesmos 12 ensaios realizados, verifica-se que 9 deles apresentam um PCI superior a 10 MJ/kg. Os ensaios que apresentam um teor de humidade inferior a 20%, à exceção de um ensaio que requereu 14 dias, o tempo de duração foi entre os 22 e 27 dias.

Através da Figura 6.53, observa-se a perda do teor de humidade, em percentagem, que ocorre em cada um dos ensaios. Verifica-se que nos ensaios em túnel e com recurso a telas, é onde ocorre maior perda de humidade. Esta redução de humidade vai fazer com que o CDR, quando vendido à SECIL, tenha um valor superior, pois com a redução do teor de humidade, dá-se o aumento do PCI.

Como desvantagens da utilização de tela, está o facto de a tela necessitar de manutenção, pois ao longo de todo o processo sofrem desgaste, e a própria gordura presente no CDR, irá colmatar os microporos da tela. A própria terá um tempo de vida útil, ou seja, a certa altura necessitará de ser substituída. Também se observa que os ensaios que apresentam um menor teor de humidade, e

maior PCI, são os ensaios que tiveram a duração entre 22 e 29 dias, o que levanta a questão se o processo será economicamente viável.

Tanto no ensaio de bio-secagem em túnel, como no ensaio com recurso a telas, observa-se que, quanto mais dias dura o ensaio, mais baixos são resultados em termos do teor de humidade.

A Tabela 6.1 apresenta uma síntese conclusiva com as vantagens e desvantagens de cada um dos ensaios de bio-secagem. Conclui-se que a baia e a tela são tecnologias muito semelhantes, diferindo apenas na construção em alvenaria nas laterais e no topo da baia.

Tabela 6.1: Síntese das vantagens e desvantagens de cada um dos ensaios de bio-secagem

	Vantagens	Desvantagens
Túnel	Processo interessante para sistema que já possua túneis de compostagem	Custo de investimento na construção dos túneis
Baia	Investimento menor, comparativamente com a construção dos túneis	Colmatação dos microporos da tela Tela necessita de manutenção devido a desgaste
Tela	Investimento menor, comparativamente com a construção dos túneis	Colmatação dos microporos da tela Tela necessita de manutenção devido a desgaste

7 Conclusão

Os resíduos assumem-se cada vez mais como uma oportunidade, em detrimento de serem encarados como um problema.

O PERSU 2020 ajuda a consubstanciar essa visão, através das metas que estabelece, o que se revela bastante importante, dado a necessidade que, nomeadamente, a indústria cimenteira tem em suprimir as necessidades de aquisição de combustível alternativo, CDR, ao combustível fóssil, como o carvão ou *petcoke*.

A utilização de CDR como combustível alternativo nos fornos de produção de cimento, traduz-se em benefícios ambientais, onde se destacam:

- Aumento da procura de combustível a partir de fontes alternativas;
- Redução das emissões de GEE;
- Ganhos em termos de carbono biogénico
- Redução da deposição em aterro;
- Cumprimento da Diretiva 2009/28/CE, das energias renováveis, que estabelece uma quota de 20% de energia renovável;
- Contribuição para o cumprimento do PERSU 2020.

Traduzindo-se também em vantagens económicas, entre as quais:

- Redução do volume ocupado em aterro;
- Ganhos na ordem dos 15€/m³ de ocupação no aterro;
- Ganhos no transporte para o aterro;
- Redução dos custos de operação em aterro;
- Redução do consumo de combustível fóssil;
- Ganhos em relação à TGR;
- Ganhos na parte da cimenteira, pois não adquire combustível fóssil;
- Redução das emissões de CO₂ de origem fóssil, sendo uma vantagem no mercado de transações de licenças para a emissão de CO₂.

Os ensaios de bio-secagem realizados na VALNOR tinham como objetivo aferir se o CDR final poderia sofrer uma redução de humidade de modo a cumprir com as exigências da indústria cimenteira coloca, de forma a ser utilizado como combustível alternativo em detrimento dos combustíveis fósseis usados nos fornos das cimenteiras. No limite, o objetivo primordial da indústria cimenteira é a substituição de 100% do combustível fóssil pelo combustível alternativo, o CDR.

Estes ensaios permitiram retirar conclusões que validaram as mais-valias da utilização dos métodos de bio-secagem descritas nesta dissertação, mas acima de tudo, conseguiu-se que se demonstrasse que a tecnologia de bio-secagem é uma solução tecnológica válida a adotar.

Quanto aos diferentes materiais utilizados nos ensaios, não se torna evidente quais os que melhor reagem à bio-secagem, à exceção do ensaio onde o *input* é CDR com granulometria inferior a 200 mm, juntamente com uma fração de finos orgânicos, que apresenta um teor de humidade final de 10,9%.

Os resultados acima apresentados demonstram que o processo de bio-secagem poderá ser um caminho para procurar cumprir a especificação da indústria cimenteira, de receber um CDR com um teor de humidade inferior a 20%.

Pode-se também concluir que dos resultados obtidos se demonstra que o processo de bio-secagem tem dificuldade no cumprimento da especificação da indústria cimenteira no que se refere ao teor de humidade inferior a 20%, relevando-se contudo a sua eficácia na redução do teor de humidade que atingiu em média os 25%.

No médio/longo prazo, perspetiva-se que a indústria cimenteira tenderá a procurar obter, um CDR com teor de humidade de 10%, por exigências de razões ambientais e económicas do processo produtivo, pelo que outros estudos e diferentes métodos terão de ser analisados e avaliados, sobre esta temática.

Neste enquadramento, uma das soluções que logicamente passará a ser uma solução viável, será o reforço do processo de bio-secagem com auxílio da secagem térmica, aproveitando-se:

- O calor gerado pelos motores que são alimentados com biogás;
- O calor gerado pelo forno na cimenteira.

Esta solução teria de ser estudada para cada um dos sistemas produtores de CDR. Por exemplo, a AMARSUL, que dista 30 km da fábrica SECIL do Outão em Setúbal, pode não compensar o investimento num secador. Já o caso da VALNOR, que fica a 170 km da fábrica SECIL do Outão em Setúbal, já poderia compensar o investimento num secador térmico, em detrimento do transporte de CDR com um teor de humidade entre 25 a 30%.

Para as instalações que já possuem túneis de compostagem, pode ser viável a biosecagem. Para os sistemas que não possuem esta tecnologia, a sua construção implicaria um elevado CAPEX (Capital Expenditure), deixando de ser um processo economicamente interessante.

Por outro lado a Portaria n.º 187-A/2014, de 17 de Setembro, que aprova o PERSU 2020, admite o fim do estatuto de resíduo aos CDR, seja no quadro europeu ou apenas no quadro nacional, o que poderá facilitar o seu escoamento e aumentar o seu valor económico, quer através do cumprimento

dos critérios de qualidade para a sua atribuição, quer da potencial redução da carga administrativa associada ao seu uso.

O fim de estatuto de resíduo para o CDR irá permitir que este seja utilizado como combustível em outras indústrias, como por exemplo, a da cerâmica. Irá ainda permitir a sua livre circulação pelos Estados Membros, o que poderá contribuir para o aumento das quotas de exportação.

Também o incremento da TGR servirá para dinamizar o escoamento do CDR, assim como funcionar como instrumento de desincentivo à deposição de resíduos em aterro e como instrumento de promoção de melhores práticas na gestão de RU. Este instrumento económico-financeiro funcionará como um desincentivo à deposição em aterro, através do agravamento da taxa de deposição, e incentiva a práticas mais eficientes, promovendo o desvio de recicláveis de aterro.

Trabalho futuro

Os ensaios desenvolvidos na presente dissertação demonstram que o processo de bio-secagem é válido e consegue efetivamente atingir uma redução do teor de humidade que se aproxima dos 20%. Contudo, seria interessante que de futuro fossem realizados novos ensaios, com diferentes métodos, recorrendo às melhores tecnologias disponíveis.

Como trabalho futuro sugerem-se ensaios de bio-secagem, complementares com ensaios de secagem térmica. Perspetiva-se que a indústria cimenteira, em 2015, inicie um projeto piloto onde irá aproveitar o calor do forno para reduzir o teor de humidade do CDR. Esta será certamente uma ótima oportunidade de estudar estes dois métodos a trabalhar de forma complementar.

Neste enquadramento da substituição de combustível fóssil por um combustível alternativo, também seria interessante a realização de um estudo avaliando a utilização de CDR na indústria da cerâmica.

Por último, salienta-se que a indústria em parceria com os sistemas e universidades, devem aproveitar os fundos comunitários, como é exemplo o QREN (Quadro de Referência Estratégica Nacional), para o período 2014-2020, para projetos de Investigação, Desenvolvimento & Inovação (I,D&I). É expectável que no período pós-troika, e tendo início o novo Quadro de fundos comunitários, sejam retomados os investimentos em I,D&I, seja ao nível de financiamento em projetos, ou em atribuição de bolsas de investigação.

Bibliografia

Adani, F.; Baido, D.; Calcaterra, E.; Genevini, P. (2002). *The influence of biomass temperature on biostabilization-biodrying of municipal solid waste*. Bioresource Technology, 83 (3), pp. 173 – 179.

ANDRITZ (2014). Leading Technologies for biomass drying. ANDRITZ. <http://www.andritz.com/products-and-services/pf-detail.htm?industryid=1195647&applicationid=1196010&pid=15137> (consultado em Agosto de 2014).

APA (2013a). *Relatório Anual Resíduos Urbanos 2012*. Agência Portuguesa do Ambiente, Amadora, Dezembro de 2013.

APA (2013). *Relatório do Estado do Ambiente 2013 Portugal*. Agência Portuguesa do Ambiente, Outubro de 2013.

APA (2014a). *Plano Estratégico para os Resíduos Sólidos Urbanos*. Agência Portuguesa do Ambiente. <http://www.apambiente.pt/index.php?ref=16&subref=84&sub2ref=108&sub3ref=209> (consultado em Julho de 2014).

APA (2014b). *Gestão de Resíduos Urbanos*. Agência Portuguesa do Ambiente. <http://www.apambiente.pt/index.php?ref=16&subref=84&sub2ref=933> (consultado em Junho de 2014).

APA (2014c). *Taxa de Gestão de Resíduos*. Agência Portuguesa do Ambiente. <http://www.apambiente.pt/ajaxpages/destaque.php?id=163> (consultado em Agosto de 2014).

AVE (2014a). *Combustíveis alternativos*. AVE – Gestão Ambiental e Valorização Energética. <http://ave.pt/03coprocessamento/01valorizacao-energetica.php> (consultado em Agosto de 2014).

AVE (2014b). *Resíduos com valor acrescentado*. AVE – Gestão Ambiental e Valorização Energética. <http://ave.pt/03coprocessamento/> (consultado em Agosto de 2014).

Baciacchi, R.; Costa, G.; Lategano, E.; Marini, C.; Poletini, A.; Pomi, R.; Postorino, P.; Rocca, S. (2010). *Accelerated carbonation of different size fractions of bottom ash from RDF incineration*. Waste Management, 30 (7), pp. 1310 – 1317.

Boldrin, A.; Neidel, T.L.; Damgaard, A.; Bhandar, G.S.; Møller, J.; Christensen, T.H. (2011). *Modelling of environmental impacts from biological treatment of organic municipal waste in EASEWASTE*. Waste Management, 31 (4), pp. 619 – 630.

Cabeças, A. (2012). *Aterro sanitário – Enquadramento, conceitos gerais e bases de projecto*. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

Cabeças, A. (2013). *Resíduos Sólidos Urbanos – Conceitos gerais, geocentro, deposição, recolha e aterro sanitário. Sebenta técnica de apoio*. Departamento de Ciências e Engenharia do Ambiente, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

Cadena, E.; Colón, J.; Artola, A.; Sánchez, A.; Font, X. (2009). *Environmental impact of two aerobic composting technologies using life cycle assessment*. The International Journal of Life Cycle Assessment, 14 (5), pp. 401 – 410.

Caputo, A.C.; Pelagagge, P.M. (2002). *RDF production plants: I Design and costs*. Applied Thermal Engineering, 22 (4), pp. 423 – 437.

Carvalho, P.; Marques, R.C. (2014). *Economies of size and density in municipal solid waste recycling in Portugal*. Waste Management, 34 (1), pp. 12 – 20.

CCE (2000). *Decisão da Comissão 2000/532/CE, de 3 de Maio de 2000*. Comissão das Comunidades Europeias. Jornal Oficial das Comunidades Europeias, 6 de Setembro de 2000, pp. L 226/3 – L 226/24.

Chang, Y.-H.; Chen, W.C.; Chang, N.-B. (1998). *Comparative evaluation of RDF and MSW incineration*. Journal of Hazardous Materials, 58 (1-3), pp. 33 – 45.

Cheng, H.; Zhang, Y.; Meng, A.; Li, Q. (2007). *Municipal Solid Waste Fueled Power Generation in China: A Case Study of Waste-to-Energy in Changchun City*. Environmental Science & Technology, 41 (21), pp. 7509 – 7515.

Chyang, C.-S.; Han, Y.-L.; Wu, L.-W.; Wan, H.-P.; Lee, H.-T.; Chang, Y.-H. (2010). *An investigation on pollutant emissions from co-firing of RDF and coal*. Waste Management, 30 (7), pp. 1334 – 1340.

CUE (1999). *Directiva 1999/31/CE, de 26 de Abril de 1999*. Conselho da União Europeia. Jornal Oficial das Comunidades Europeias, 16 de Julho de 1999, pp. L 182/1 – L 182/19.

Dias, S.; Costa, M. (2006). *Avaliação do Potencial de Produção e Utilização de CDR em Portugal Continental*. Centro de Engenharia Biológica e Química, Instituto Superior Técnico, Julho de 2006.

Dong, T.T.T.; Lee, B.-K. (2009). *Analysis of potential RDF resources from solid waste and their energy values in the largest industrial city of Korea*. Waste Management, 29 (5), pp. 1725 – 1731.

Dufour, P. (2006). *Control Engineering in Drying Technology: Review and Trends*. Drying Technology, 24 (7), pp. 889 – 904.

EC (2014). *Moving towards a circular economy*. European Commission. <http://ec.europa.eu/environment/circular-economy/> (consultado em Agosto de 2014).

ECS (2005) *CEN/TS 15359:2005 Solid recovered fuels – Specifications and classes*. European Committee for Standardization.

ECS (2006a). *CEN/TS 15357:2006 Solid recovered fuels – Terminology, definitions and descriptions*. European Committee for Standardization, Maio de 2006.

ECS (2006b) *CEN/TS 15414-3:2006 Solid recovered fuels – Determination of moisture content using the oven dry method – Part 3: Moisture in general analysis sample*. European Committee for Standardization.

ECS (2006c) *CEN/TS 15403:2006 Solid recovered fuels – Methods for the determination of ash content*. European Committee for Standardization.

ECS (2006d) *CEN/TS 15400:2006 Solid recovered fuels – Methods for the determination of calorific value*. European Committee for Standardization, Outubro de 2006.

ECS (2008). *CEN/TR 15716:2008 Solid recovered fuels – Determination of combustion behaviour*. European Committee for Standardization, Junho de 2008.

EGF (2014). *Enquadramento para o tratamento e valorização de resíduos*. Empresa Geral do Fomento. <http://www.egf.pt/content/index.php?action=detailfo&rec=1803&t=Apresentacao> (consultado de Junho de 2014).

ERSAR (2013). *Relatório Anual dos Serviços de Águas e Resíduos em Portugal (2012). Volume 1 – Caracterização Geral do Setor*. Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos. Setembro de 2013.

ERSAR (2014). *Taxa de Gestão de Resíduos*. Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos. <http://www.ersar.pt/website/ViewContent.aspx?Section=Consumidores&SubFolderPath=&FolderPath=>

[%5CRoot%5CContents%5CSitio%5CConsumidores%5CPerguntasFrequentes%5CConsumidor_Faturacao&GenericContentId=599](#) (consultado em Agosto de 2014).

Ferrão, P.; Pinheiro, L. (2011). *Plano Nacional de Gestão de Resíduos 2011-2020 – Proposta de PNGR*. 26 de Maio de 2011.

García-López, J.; Rad, C.; Navarro, M. (2014). *Strategies of management for the whole treatment of leachates generated in a landfill and in a composting plant*. Journal of Environmental Science and Health, Part A, 49 (13), pp. 1520 – 1530.

Garg, A.; Smith, R.; Hill, D.; Longhurst, P.J.; Pollard, S.J.T.; Simms, N.J. (2009). *An integrated appraisal of energy recovery options in the United Kingdom using solid recovered fuel derived from municipal solid waste*. Waste Management, 29 (8), pp. 2289 – 2297.

Genon, G.; Brizio, E. (2008). *Perspectives and limits for cement kilns as a destination for RDF*. Waste Management, 28 (11), pp. 2375 – 2385.

Gupta, A.K.; Rohrbach, E.M. (1991). *Refuse Derived Fuels*. Technology, Processing, Quality and Combustion Experiences, Conference. San Diego, California, EUA, pp. 49 – 59.

Hwang, I-H.; Kobayashi, J.; Kawamoto, K. (2014). *Characterization of products obtained from pyrolysis and steam gasification of wood waste, RDF, and RPF*. Waste Management, 34 (2), pp. 402 – 410.

IEA (2003). *Municipal Solid Waste and its Role in Sustainability*. IEA Bioenergy.

IPQ (2008). *Norma Portuguesa 4486 – Combustíveis derivados de resíduos – Enquadramento para a produção, classificação e gestão da qualidade*. Instituto Português da Qualidade, Dezembro de 2008.

Jewell, W.; Dondero, N.; Soest, P.v.; Cummings, R.; Vegara, W.; Linkenheil, R. (1984). *High Temperature Stabilization and Moisture Removal from Animal Wastes for By-Product Recovery*. Final Report for the Cooperative State Research Service. Washington, EUA.

Kääntee, U.; Zevenhoven, R.; Backman, R.; Hupa, M. (2004). *Cement manufacturing using alternative fuels and the advantages of process modelling*. Fuel Processing Technology, 85 (4), pp. 293 – 301.

Kaddatz, K.T.; Rasul, M.G.; Rahman, A. (2013). *Alternative fuels for use in cement kilns: process impact modelling*. Procedia Engineering, 56 (0), pp. 413 – 420.

Kara, M.; Günay, E.; Tabak, Y.; Yıldız, Ş. (2009). *Perspectives for pilot scale study of RDF in Istanbul, Turkey*. Waste Management, 29 (12), pp. 2976 – 2982.

MAMAOT (2013). *Decreto-Lei n.º 127/2013, de 30 de Agosto*. Ministério da Agricultura, do Mar, do Ambiente e do Ordenamento do Território. Diário da República, 1.ª série – N.º 167, 30 de Agosto de 2013, pp. 5324 – 5389.

Lechtenberg, D. (2009). *Spent Cell Linings from The Aluminium Smelting Process as an Alternative Fuel and Raw Material for Cement Production*. Global Cement Magazine, pp. 36 – 37.

Levy, J.Q.; Cabeças, A.J. (2006). *Resíduos Sólidos Urbanos – Princípios e Processos*. Associação das Empresas Portuguesas para o Sector do Ambiente, 1.ª Edição, Abril de 2006.

LIPOR (2014). *Economia Circular*. Serviço Intermunicipalizado de Gestão de Resíduos do Grande Porto. <http://www.lipor.pt/pt/noticias/seminario-economia-circular-uma-tendencia-de-inovacao/> (consultado em Julho de 2014).

Ma, W.; Hoffmann, G.; Schirmer, M.; Chen, G.; Rotter, V.S. (2010). *Chlorine characterization and thermal behavior in MSW and RDF*. Journal of Hazardous Materials, 178 (1-3), pp. 489 – 498.

MAOT (2001). *Decreto-Lei n.º 11/2001, de 23 de Janeiro*. Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território. Diário da República, 1.ª série – N.º 19, 23 de Janeiro de 2001, pp. 342 – 347.

MAOT (2005). *Decreto-Lei n.º 85/2005, de 28 de Abril*. Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território. Diário da República, 1.ª série – N.º 82, 28 de Abril de 2005, pp. 3214 – 3234.

MAOT (2010). *Despacho n.º 3227/2010*. Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território. Diário da República, 2.ª série – N.º 36, 22 de Fevereiro de 2010, pp. 7650 – 7704.

MAOT (2011). *Decreto-Lei n.º 73/2011, de 17 de Junho*. Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território. Diário da República, 1.ª série – N.º 116, 17 de Junho de 2011, pp. 3251 – 3300.

MAOTDR (2006). *Decreto-Lei n.º 178/2006, de 5 de Setembro*. Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional. Diário da República, 1.ª série – N.º 171, 5 de Setembro de 2006, pp. 6526 – 6545.

MAOTDR (2007). *Portaria n.º 187/2007, de 12 de Fevereiro*. Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional. Diário da República, 1.ª série – N.º 30, 12 de Fevereiro de 2007, pp. 1045 – 1118.

MAOTDR (2008). *Decreto-Lei n.º 45/2008, de 11 de Março*. Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional. Diário da República, 1.ª série – N.º 50, 11 de Março de 2008, pp. 1539 – 1543.

MAOTDR (2009a). *Decreto-Lei n.º 183/2009, de 10 de Agosto*. Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional. Diário da República, 1.ª série – N.º 153, 10 de Agosto de 2009, pp. 5170 – 5198.

MAOTDR (2009b). *Portaria n.º 851/2009, de 7 de Agosto*. Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional. Diário da República, 1.ª série – N.º 152, 7 de Agosto de 2009, pp. 5143 – 5146.

MAOTDREI (2009). *Despacho n.º 21295/2009, de 22 de Setembro*. Ministérios do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional e da Economia e da Inovação. Diário da República, 2.ª série – N.º.184, 22 de Setembro de 2009, pp. 38523 – 38538.

MAOTE (2014a). *PERSU 2020 – Proposta de Plano Estratégico para os Resíduos Urbanos*. Ministério do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia.

MAOTE (2014b). *Portaria n.º 187-A/2014, de 17 de Setembro*. Ministério do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia. Diário da República, 1.ª série – N.º 179, 17 de Setembro de 2014.

MAOTE (2014c). *Compromisso para o Crescimento Verde*. Ministério do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia, 15 de Setembro de 2014.

Martinho, G.; Silveira, A. (2008). *Caracterização de Resíduos para Avaliação do Potencial para Valorização Energética*. Departamento de Ciências e Engenharia do Ambiente, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Caparica, 2008.

Martinho, M.G.M.; Gonçalves, M.G.P.; Silveira, A.I.E. (2011). *Gestão Integrada de Resíduos*. Universidade Aberta.

MEADRSPSCOTA (2004). *Portaria n.º 209/2004, de 3 de Março*. Ministérios da Economia, da Agricultura, Desenvolvimento Rural e Pescas, da Saúde e das Cidades, Ordenamento do Território e Ambiente. Diário da República, 1.ª série-B – N.º.53, 3 de Março de 2004, pp. 1188 – 1206.

MEI (2007). *Decreto-Lei n.º 199/2007, de 18 de Maio*. Ministério da Economia e da Inovação. Diário da República, 1.ª série – N.º 96, 18 de Maio de 2007, pp. 3366 – 3368.

- Mokrzycki, E.; Uliasz-Bocheńczyk, A. (2003). *Alternative fuels for the cement industry*. Applied Energy, 74 (1-2) pp. 95 – 100.
- Montejo, C.; Costa, C.; Ramos, P.; Márquez, M.C. (2011). *Analysis and comparison of municipal solid waste and reject fraction as fuels for incineration plants*. Applied Thermal Engineering, 31 (13), pp. 2135 – 2140.
- Montejo, C.; Tonini, D.; Márquez, M.C.; Astrup, T.F. (2013). *Mechanical-biological treatment: Performance and potentials. An LCA of 8 MBT plants including waste characterization*. Journal of Environmental Management, 128 (0), pp. 661 – 673.
- Norbu, T.; Visvanathan, C.; Basnayake, B. (2005). *Pretreatment of municipal solid waste prior to landfilling*. Waste Management, 25 (10), pp. 997 – 1003.
- Patumsawad, S.; Cliffe, K.R. (2002). *Experimental study on fluidised bed combustion of high moisture municipal solid waste*. Energy Conversion and Management, 43 (17), pp. 2329 – 2340.
- PECUE (2006). *Regulamento (CE) N.º 1013/2006, de 14 de Junho de 2006*. Parlamento Europeu e do Conselho da União Europeia. Jornal Oficial da União Europeia, 12 de Julho de 2006.
- PECUE (2008). *Directiva 2008/98/CE, de 19 de Novembro de 2008*. Parlamento Europeu e do Conselho da União Europeia. Jornal Oficial da União Europeia, 22 de Novembro de 2008, pp. L 312/3 – L 312/30.
- PECUE (2009). *Directiva 2009/28/CE, de 23 de Abril de 2009*. Parlamento Europeu e do Conselho da União Europeia. Jornal Oficial da União Europeia, 5 de Junho de 2009, pp. L 140/16 – L 140/62.
- PECUE (2010). *Directiva 2010/75/UE, de 24 de Novembro de 2010*. Parlamento Europeu e do Conselho da União Europeia. Jornal Oficial da União Europeia, 17 de Dezembro de 2010, pp. L 334/17 – L 334/119.
- Piedade, M.; Aguiar, P. (2010). *Opções de Gestão de Resíduos Urbanos. Série Guias Técnicos n.º 15*. Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos.
- Rada, E.C.; Franzinelli, A.; Taiss, M.; Ragazzi, M.; Panaitescu, V.; Apostol, T. (2007). *Lower Heating Value Dynamics during Municipal Solid Waste Bio-Drying*. Environmental Technology, 28 (4), pp. 463 – 469.
- Reichling, J.P.; Kulacki, F.A. (2011). *Comparative analysis of Fischer-Tropsch and integrated gasification combined cycle biomass utilization*. Energy, 36 (11), pp. 6529 – 6535.
- Rocca, S.; Zomeren, A.v.; Costa, G.; Dijkstra, J.J.; Comans, R.N.J.; Lombardi, F. (2012). *Characterisation of major component leaching and buffering capacity of RDF incineration and gasification bottom ash in relation to reuse or disposal scenarios*. Waste Management, 32 (4), pp. 759 – 768.
- Rodrigues, J.P. (2014). *Tecnologias para Resíduos – A unidade de preparação de CDR da VALNOR*. Jornal Água & Ambiente, Julho de 2014.
- Sarc, R.; Lorber, K.; Pomberger, R.; Rogetzer, M.; Sipple, E. (2014). *Design, quality, and quality assurance of solid recovered fuels for the substitution of fossil feedstock in the cement industry*. Waste Management & Research, 32 (7), pp. 565 – 585.
- Saxena, S.C.; Rao, N.S. (1993). *Fluidized-Bed Incineration of Refuse-Derived Fuel Pellets*. Energy & Fuels, 7 (2), pp. 273 – 278.
- SECIL (2014a). *Factos históricos da SECIL*. SECIL. <http://www.secil.pt/default.asp?pag=historico> (consultado em Julho de 2014).

SECIL (2014b). *SECIL Outão*. SECIL. <http://www.secil.pt/default.asp?pag=outao>. (consultado em Julho de 2014).

SECIL (2014c). *Processo de fabrico do cimento produzido na SECIL*. SECIL. http://www.secil.pt/default.asp?pag=proc_fabrico (consultado em Julho de 2014).

Shao, L-M.; Ma, Z-H.; Zhang, H.; Zhang, D-Q.; He, P-J. (2010). *Bio-drying and size sorting of municipal solid waste with high water content for improving energy recovery*. Waste Management, 30 (7), pp. 1165 – 1170.

Silveira, A. (2013). *EoW para o Composto – Avanços e Recuos*. Seminário ADPA/Ordem dos Engenheiros, Lisboa, 29 de Outubro de 2013.

STELA (2014). *Low-temperature belt dryer for SSW (MSW/RDF) (solid shredded waste)*. STELA. http://www.stela.de/en/products/niedertemperatur_bandtrockner/for_ssw_msw_rdf_drying/ (consultado em Setembro de 2014).

Sugni, M.; Calcaterra, E.; Adani, F. (2005). *Biostabilization-biodrying of municipal solid waste by inverting air-flow*. Bioresource Technology, 96 (12), pp. 1331 – 1337.

Tsiliyannis, C.A. (2012). *Alternative fuels in cement manufacturing: Modeling for process optimization under direct and compound operation*. Fuel, 99 (0), pp. 20 – 39.

UNEP (2011). *Towards a Green Economy – Pathways to Sustainable Development and Poverty Eradication*. United Nations Environment Programme, 2 de Novembro de 2011.

VALNOR (2014a). *Caracterização de Resíduos Urbanos do Sistema Multimunicipal do Norte Alentejano – Relatório Final 2013*. EGF, Janeiro de 2014.

VALNOR (2014b). *Abrangência da VALNOR*. VALNOR – Valorização e Tratamento de Resíduos Sólidos do Norte Alentejano. <http://www.valnor.pt/AValnor/Abrangencia/tabid/67/language/pt-PT/Default.aspx> (consultado em Abril de 2014).

VALNOR (2014c). *Folhetos da VALNOR*. VALNOR – Valorização e Tratamento de Resíduos Sólidos do Norte Alentejano. <http://www.valnor.pt/Documentos/Folhetos/tabid/149/language/pt-PT/Default.aspx> (consultados em Abril de 2014).

VALNOR (2014d). *Certificações da VALNOR*. VALNOR – Valorização e Tratamento de Resíduos Sólidos do Norte Alentejano. <http://www.valnor.pt/AValnor/Certificacoes/tabid/70/language/pt-PT/Default.aspx> (consultado em Abril de 2014).

Vehlow, J.; Bergfeldt, B.; Visser, R.; Wilén, C. (2007). *European Union waste management strategy and the importance of biogenic waste*. Journal of Material Cycles and Waste Management, 9 (2), pp. 130 – 139.

Velis, C.A.; Longhurst, P.J.; Drew, G.H.; Smith, R.; Pollard, S.J.T. (2009). *Biodrying for mechanical-biological treatment of wastes: A review of process science and engineering*. Bioresource Technology, 100 (11), pp. 2747 – 2761.

Velis, C.A.; Longhurst, P.J.; Drew, G.H.; Smith, R.; Pollard, S.J.T. (2010). *Production and Quality Assurance of Solid Recovered Fuels Using Mechanical-Biological Treatment (MBT) of Waste: A Comprehensive Assessment*. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 40 (12), pp. 979 – 1105.

Vesterinen, R.; Lohiniva, E. (2000). *Co-Firing of MSW and RDF*. VTT Energy – Fuels and Combustion, New Energy Technologies. IEA Bioenergy Task 23, Jyväskylä, 13 de Dezembro de 2000.

Zawadzka, A.; Krzystek, L.; Ledakowicz, S. (2009). *Autothermal Drying of Organic Fraction of Municipal Solid Waste*. Environment Protection Engineering, 35 (3), pp. 123 – 133.

Zawadzka, A.; Krzystek, L.; Stolarek, P.; Ledakowicz, S. (2010). *Biodrying of Organic Fraction of Municipal Solid Wastes*. *Drying Technology*, 28 (10), pp. 1220 – 1226.

Zhang, D-Q.; He, P-J.; Jin, T-F.; Shao, L-M. (2008). *Bio-drying of municipal solid waste with high water content by aeration procedures regulation and inoculation*. *Bioresource Technology*, 99 (18), pp. 8796 – 8802.